

Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde

**Achtergronddocument Systeembeschrijving
Schelde-estuarium**

**Een visie op de macro-morfologische
ontwikkeling**

Kwaliteitscontrole

Gezien door m.e.r.-coördinator (P.A. Weijers):		Gezien door projectdirecteur (H.B. van Essen):	
Handtekening:	Datum:	Handtekening	Datum:

Colofon

Uitgave	Dit Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde is een uitgave van het project Verruiming vaargeul van RWS Zeeland en MOW Maritieme Toegang.
Opdrachtgever	Technische Scheldec commissie
Opdrachtnemer	Consortium ARCADIS - Technum
Titel	Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde. Achtergrond document Systeembeschrijving Schelde-estuarium. Een visie op de macro-morfologische ontwikkeling.
Auteur(s)	Arjan van der Weck
Status	Versie 3.1
Datum	13 augustus 2007
Bestandsnaam	070813 Achtergrond document Systeembeschrijving versie 3.1.pdf

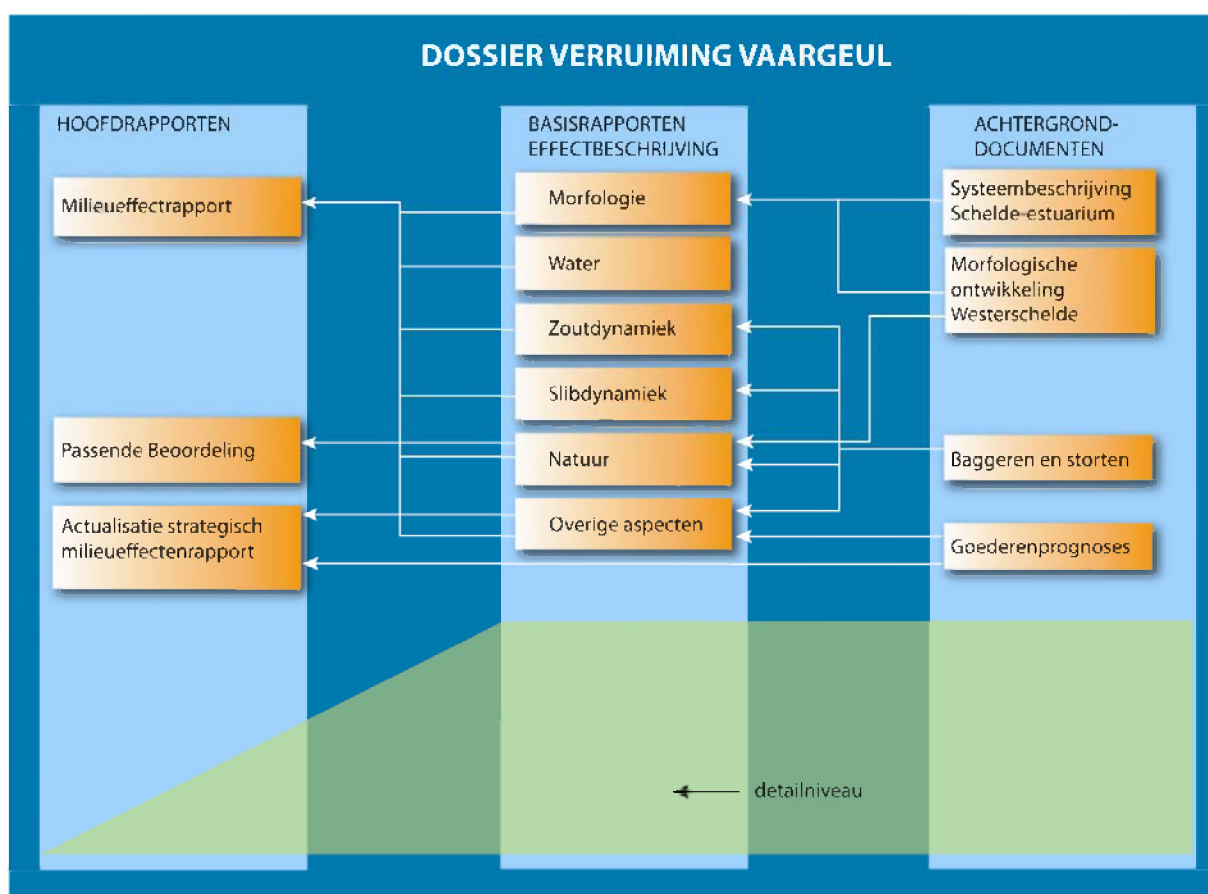
Inhoudsopgave

Leeswijzer dossier “Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde”	5
1 Inleiding	9
1.1 Beheer en beleid Schelde-estuarium	9
1.2 De voorgenomen verruiming	9
1.3 Systeembeschrijving	10
1.4 Uitwerking	10
2 Geschiedenis van het estuarium	17
2.1 Ontstaan en ontwikkeling	17
2.2 Bodemsamenstelling en invloed op de morfodynamiek	21
2.3 Inpolderingen	22
2.4 Verdiepingen	24
2.5 Baggeren en storten	26
2.5.1 Algemene historiek	26
2.5.2 De baggerwerken in de Westerschelde	27
2.5.3 Baggerwerken in de Beneden-Zeeschelde	29
2.6 Zandwinning	31
2.7 Leidammen	33
2.8 Evolutie van de hydrodynamica	34
2.9 Evolutie van het geulenstelsel	39
2.10 Evolutie van arealen	42
2.11 Zandbalans	45
3 Fenomenologische beschrijving van het natuurlijk morfologisch systeem	53
3.1 Ruimte- en tijdschalen	53
3.2 Hydrodynamica	54
3.3 Meergeulensysteem	60
3.4 Sedimenthuishouding	62
3.5 Onderzoeksparemeters	63
3.5.1 Kantelindex	63
3.5.2 Verhangindicator	63
3.5.3 Stortcapaciteit	64
3.5.4 Zandhuishouding	64
4 Fenomenologische beschrijving effectingrepen	65
4.1 Effecten verdiepen	65
4.2 Effecten storten aanlegbaggerwerk	66
4.3 Onderhoudsbaggerwerk	67
4.4 Zandwinning	68
4.5 Inpolderingen	69
4.6 Veranderingen van de onderzoeksparemeters ten gevolge van ingrepen	70

5	Visie op de morfologische ontwikkeling	71
5.1	Redeneerlijn	71
5.2	Autonome ontwikkeling	72
5.2.1	Gevolgtrekkingen op basis van waarnemingen	72
5.2.2	Grootschalige morfologische processen	74
5.2.3	Synthese van waarnemingen en processen met betrekking tot verwachte ontwikkeling	75
5.3	Verruiming van de vaargeul	76
5.3.1	Effecten van de aanleg van de verdieping	77
5.3.2	Effecten van het vaargeulonderhoud	77
5.3.3	Dynamisch sedimentbeheer	78
5.4	Integratie van observaties, kennis en modellen	79
6	Referenties	81
	Appendix A Evolutie van het geulenstelsel	84

Leeswijzer dossier “Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde”

Het dossier Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde bevat het Milieueffectrapport, een Passende Beoordeling en een Actualisatie van het strategisch milieueffectenrapport. Deze hoofdrapporten worden nader onderbouwd en toegelicht in verschillende basirapporten en achtergronddocumenten. De samenhang tussen deze documenten wordt toegelicht in onderstaande figuur.

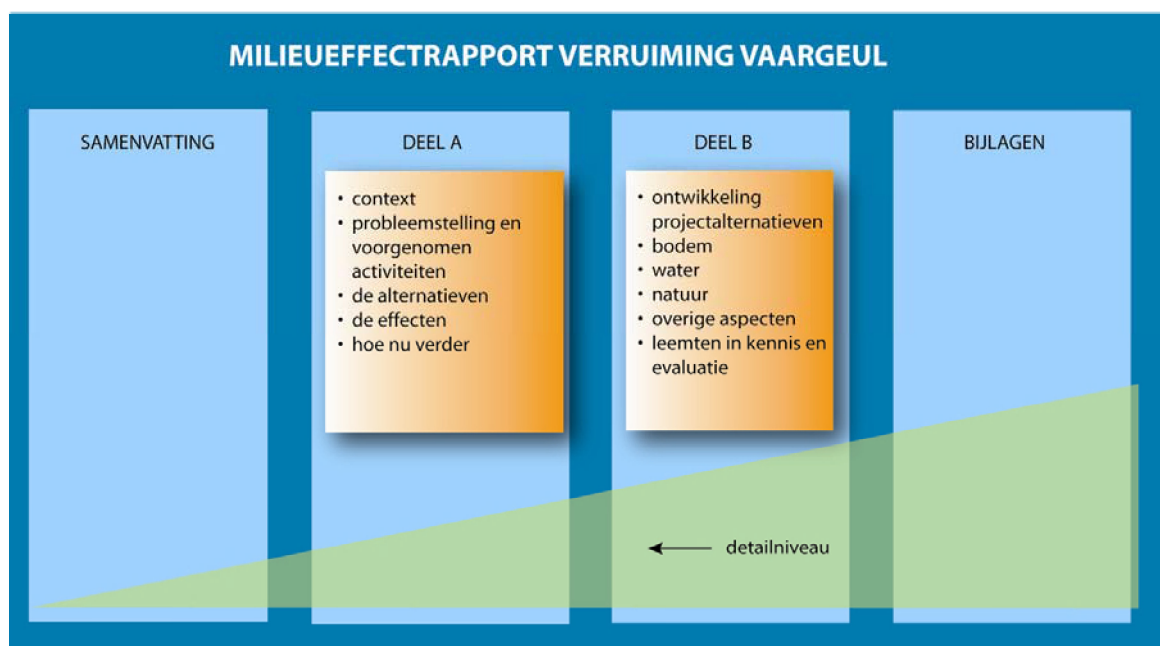


Hoofdrapport Milieueffectrapport (MER)

Het Milieueffectrapport bestaat uit een samenvatting, deel A en deel B en bijlagen. De *samenvatting* geeft snel inzicht in het dossier en de resultaten van het onderzoek. *Deel A* van het milieueffectrapport beschrijft het 'waarom' van het project, de problemen, de oplossingen en hoe de oplossingen ten opzichte van elkaar scoren. In deel A staat alle relevante informatie voor bestuurders en de besluitvorming. Een abstractieniveau dieper gaat *deel B* van het milieueffectrapport. In deze hoofdstukken worden de onderzoeken voor bodem, water, natuur en overige aspecten samengevat. Dit is een onderbouwing van deel A.

De bijlagen (achter in dit milieueffectrapport) geven extra informatie, ondermeer een overzichtskaart, een begrippenlijst en achtergrondinformatie.

Navolgend wordt de opbouw van deel A en B nader toegelicht.



Deel A

Hoofdstuk 1 *Context* beschrijft het kader waarbinnen het milieueffectrapport is opgesteld.

In Hoofdstuk 2 *Probleemstelling en voorgenomen activiteiten* worden de voorgenomen ingrepen beschreven. Waarom moet de vaargeul verruimd worden en waar moet bij de uitvoering van het project op gelet worden?

Voor het milieueffectonderzoek is de voorgenomen activiteit vertaald in alternatieven voor de uitvoering van de verdieping en verbreding van de vaargeul. Deze hebben betrekking op het bergen van de vrijkomende aanleg- en onderhoudsbaggerspecie. Hoofdstuk 3 *De alternatieven* beschrijft deze alternatieven.

In hoofdstuk 4 *De effecten* worden de effecten van de alternatieven beoordeeld. Uit deze beoordeling volgt het Meest Milieuvriendelijk Alternatief (MMA): het alternatief dat de minst nadelige gevolgen heeft voor natuur en milieu. Ook wordt het beoordelingskader, de omvang van het studiegebied en het tijdsdomein in jaren waarop de effecten worden geïnterpreteerd en beoordeeld beschreven.

In Hoofdstuk 5 *Hoe nu verder* wordt de procedure van deze milieueffectrapportage beschreven. Hier vindt u informatie over de betrokken partijen, besluitvorming en inspraakmogelijkheden.

Deel B

Hoofdstuk 6 *Ontwikkeling van projectalternatieven* beschrijft de resultaten van het onderzoek om te komen tot de projectalternatieven die in hoofdstuk 3 beschreven zijn.

Hoofdstukken 7, 8, 9 en 10 bevatten de onderzoeksresultaten op hoofdlijnen per discipline. De onderzoeksresultaten bevatten een beschrijving van de huidige toestand en van de verwachte ontwikkelingen in het Schelde-estuarium en de effecten van de alternatieven.

Hoofdstuk 11 *Leemten in kennis en evaluatie* beschrijft de kennisleemten en onzekerheden in het onderzoek en de betekenis daarvan voor de interpretatie van de resultaten.

Hoofdrapport Passende Beoordeling

De Passende Beoordeling beschrijft de gevolgen van de verruiming van de vaargeul voor de volgende Natura 2000-gebieden:

- Westerschelde en Saeftinghe;
- Schelde- en Durme-estuarium;
- Durme en Middenloop van de Schelde;
- schorren en polders van de Beneden-Schelde;
- Kuifeend en Blokkersdijk.

De Passende Beoordeling bevat de volgende onderdelen:

- Beschrijving van het project;
- Beschrijving van de van belang zijnde vogel- en habitatrictlijngebieden;
- Beschrijving van de effecten;
- Effectbeoordeling;
- Mitigerende maatregelen;
- Alternatievenonderzoek;
- Redenen van groot openbaar belang en compenserende maatregelen.

Hoofdrapport Actualisatie strategische milieueffectenrapport

De Actualisatie van het strategisch milieueffectenrapport beschrijft de effecten van de gewijzigde scheepvaartstromen over de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde als gevolg van de verruiming, uitgaande van de meest recente goederenprognoses.

Het rapport beschrijft:

- de belangrijkste conclusies op hoofdlijnen uit het strategisch milieueffectenrapport en of deze nog gelden na actualisatie van het onderzoek;
- hoe de uitgangspunten voor de goederenvervoersstromen opnieuw werden bepaald;
- de milieueffecten van deze bijgestelde goederenprognoses en de beoordeling ervan.
- de effecten van de scheepvaartstromen als gevolg van de verruiming (scenario met en zonder WCT);

Basisrapporten en achtergronddocumenten

De basisrapporten en achtergronddocumenten zijn technische en specialistische rapporten waarin de methode, resultaten en conclusies van het uitgevoerde (modelmatige) onderzoek zijn weergegeven.

De basisrapporten onderbouwen de effecten en conclusies uit het hoofdrapport. De achtergronddocumenten bieden aanvullende informatie.

Bij het milieueffectrapport horen de volgende basisrapporten:

- Basisrapport Morfologie
- Basisrapport Water
- Basisrapport Slibdynamiek
- Basisrapport Zoutdynamiek
- Basisrapport Natuur
- Basisrapport Overige Aspecten

De volgende achtergronddocumenten zijn onderbouwend aan de basisrapporten:

- Systeembeschrijving Schelde-estuarium, een visie op de macro-morfologische ontwikkeling
- Morfologische ontwikkeling Westerschelde, fenomenologisch onderzoek naar de ontwikkelingen op mesoschaal
- Baggeren en storten
- Goederenprognoses

Beschikbaarheid van informatie

Alle rapporten uit het dossier verruiming vaargeul inclusief de literatuur uit bijlage 2 van dit milieueffectrapport zijn opgenomen op de website [www.verruimingvaargeul.nl](http://www.verruimingvaargeul.nl/~.be) / ~.be.

1 Inleiding

1.1 Beheer en beleid Schelde-estuarium

Het Schelde-estuarium is al vele jaren onderwerp geweest van studies. Ingrepen, vaak met economische motieven (zandwinning, vaargeulverruiming en onderhoud, inpolderingen), leven op gespannen voet met de doelstelling de natuurwaarden van het gebied te beschermen. De Langetermijnvisie Schelde-estuarium 2030 van de Nederlandse en Vlaamse overheid vormt de basis voor gemeenschappelijk beleid voor het estuarium. Voor de drie hoofdpijlers van de visie, Veiligheid, Toegankelijkheid en Natuurlijkheid, zijn streefbeelden uitgewerkt voor de situatie in 2030. De visie noemt de volgende systeemkenmerken van het estuarium, die in stand moeten worden gehouden (LTV, 2001):

- een open en natuurlijk mondingsgebied;
- een systeem van hoofd- en nevengeulen met tussenliggende platen en ondiep watergebieden in de Westerschelde (meergeulenstelsel);
- een riviersysteem met een meanderend karakter in de Zeeschelde;
- een grote diversiteit aan habitats, vooral schorren, slikken, platen en ondiep water in zout, brak en zoet gebied, gecombineerd met natuurlijke oevers.

De concrete vertaling naar beleid en beheer voor de middellange termijn (2010) is beschreven in de Ontwikkelingsschets 2010 Schelde-estuarium. Daarnaast zijn bij de toetsing van ingrepen in een natuurlijk systeem de Europese richtlijnen, Kaderrichtlijn Water en Vogel- en Habitatrichtlijn, bepalend.

1.2 De voorgenomen verruiming

Eén van de projecten, waarover een besluit is genomen, betreft de voorgenomen verruiming (verdieping en verbreding) van de vaargeul in het Schelde-estuarium, die de haven van Antwerpen beter toegankelijk moet maken. De verruiming zal gepaard gaan met het storten van baggerspecie tijdens de aanleg en van onderhoudsbaggerspecie erna. Deze activiteit vereist, dat een milieueffectonderzoek plaatsvindt. In de Startnotitie / Kennisgeving is aangegeven welk onderzoek hiervoor nodig is. Door het Consortium ARCADIS-Technum is in het Onderzoeksplan Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde een nadere uitwerking hieraan gegeven. Het opstellen van een systeembeschrijving en het uitvoeren van simulaties met morfologische modellen vormen belangrijke onderdelen van dit onderzoeksplan.

Met de beschrijving van het morfologische systeem wordt één van de aanbevelingen van het Expertteam Milieueffectrapport Verdieping Westerschelde¹ opgevolgd met als doel de oorspronkelijke onderzoeksopzet te verbreden.

¹ Het expertteam wordt gevormd door acht onafhankelijke Nederlandse en Vlaamse experts op het gebied van morfologie en ecologie en vormt de kwaliteitsborging van het fysische en ecologische onderzoek. Het team bestaat uit de volgende leden: Prof. Dr. P.M.J. Herman, Prof. Dr. M. Hoffman, Prof. Dr. P. Meire, Prof. Ir. J.J. Peters, Drs. T. Pieters, Prof. Dr. M. Stive, Prof. Dr. W. Wolff en Prof. Dr. S. Wartel.

1.3 Systeembeschrijving

De processen die het morfologische gedrag van het estuarium bepalen zijn ingewikkeld; sedimenttransporten en resulterende morfologische veranderingen variëren in ruimte en tijd ten gevolge van veranderingen in de forcering, bodem en geometrie. Door de interacties tussen de processen wordt de complexiteit sterk vergroot. Modellen zijn nodig om kwantitatieve uitspraken te kunnen doen over te verwachten effecten van ingrepen. De belangrijkste processen worden in de morfologische modellen meegenomen en de modellen zijn tot op een bepaald niveau gekalibreerd (zie Intermezzo). Echter, een model vormt een afbeelding van de werkelijkheid en daarom zal een model per definitie altijd beperkingen hebben. Bovendien genereren modellen een grote hoeveelheid data. De resultaten dienen dan ook getoetst te worden aan de verwachte respons van het morfologische systeem op de ingrepen. De in dit rapport gepresenteerde systeembeschrijving heeft als doel een raamwerk te presenteren, waarbinnen deze toets dient plaats te vinden. Het betreft de visie van het consortium op de morfologische ontwikkeling van het Schelde-estuarium.

1.4 Uitwerking

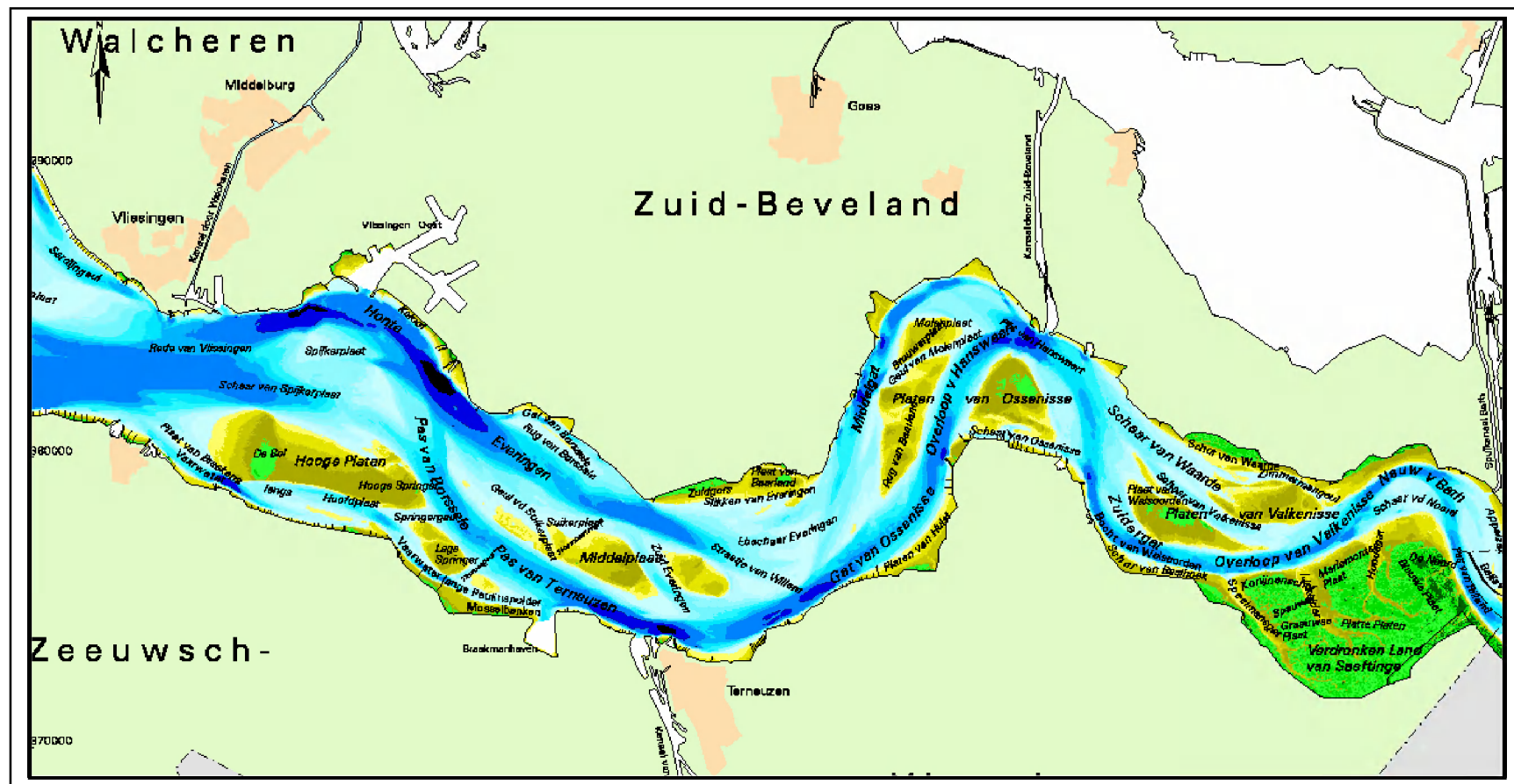
In de voorliggende systeembeschrijving wordt eerst, in hoofdstuk 2, een beschrijving gegeven van de geschiedenis van het Schelde-estuarium. Historische waarnemingen geven aan welke veranderingen het estuarium heeft doorgemaakt. Enerzijds kan hiermee een indruk worden gegeven van de natuurlijke variatie van het systeem, in het licht waarvan eventuele effecten van ingrepen moeten worden beschouwd. Anderzijds kunnen ingrepen, die in het verleden zijn uitgevoerd, veel leren over de respons van het systeem hierop. Deze kennis kan vervolgens worden gebruikt bij de voorspellingen van toekomstige ingrepen. De analyse van waarnemingen is niet eenvoudig, omdat in de loop der tijd vele ingrepen zijn uitgevoerd, waarvan de effecten niet altijd onderling zijn te isoleren. De verschillende tijdschalen, welke voor morfologische processen variëren van jaren tot eeuwen, spelen hierbij een belangrijke rol, zodat in feite nooit gesproken kan worden van een morfologisch evenwicht.

In hoofdstuk 3 wordt een fenomenologische beschrijving gegeven van het natuurlijk morfologisch systeem. Daartoe wordt het systeem beschouwd op verschillende ruimteschalen. Deze ruimteschalen zijn gebaseerd op de verschillende systeemattributen van het estuarium: de gehele Westerschelde (megaschaal), het meergeulensysteem van de Westerschelde, onderverdeeld in zes bochtgroepen (macroschaal), en de kortsluitgeulen en intergetijdengebieden (mesoschaal). Op elk van deze schalen vertoont het estuarium een specifiek gedrag. Het voordeel van een dergelijke schematisatie is dat hiermee het gehele, complexe, systeem wordt opgedeeld in een aantal eenvoudiger te analyseren componenten. Uiteraard zijn er wisselwerkingen tussen de verschillende schalen; deze zullen eveneens in hoofdstuk 3 worden aangegeven. Bij de beschrijving zal gebruik gemaakt worden van zowel fysische principes als empirische bevindingen, gebaseerd op waarnemingen. De morfologie zal worden beschreven aan de hand van een aantal onderzoeksparameters: (i) de zandbalans van de Westerschelde (op megaschaal), (ii) de kantelindex als indicator voor het gedrag van het meergeulensysteem en (iii) de stortcapaciteit (ofwel bergingscapaciteit) met betrekking tot de maximale hoeveelheid te storten sediment in de hoofdgeulen (beiden op macroschaal) en (iv) de verhangindicator als beschrijvende parameter voor de aanwezigheid van kortsluitgeulen (op mesoschaal).

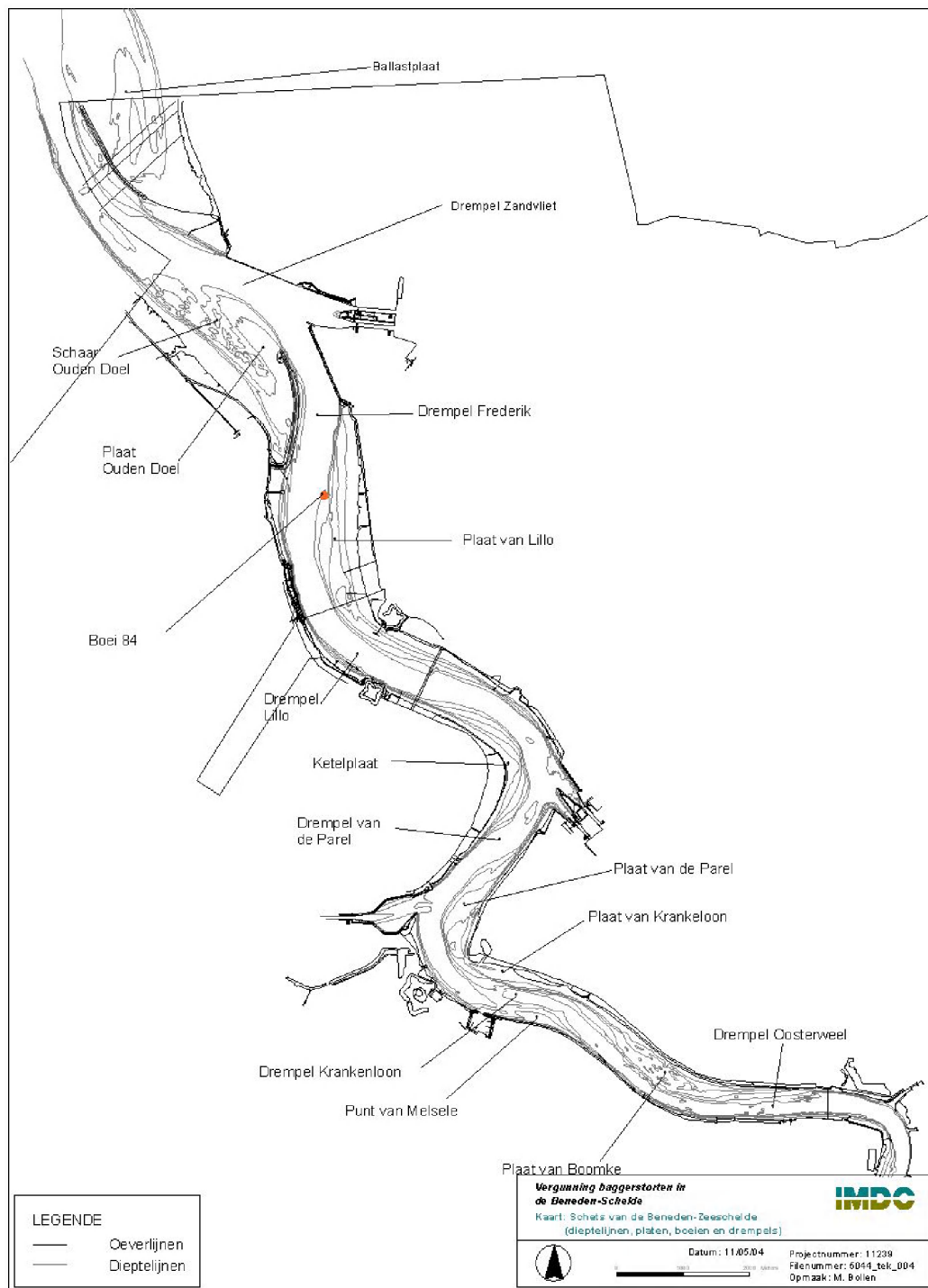
In hoofdstuk 4 worden de effecten van ingrepen (verdiepen, baggeren/storten, zandwinning en inpolderingen) beschreven, zoals die in het verleden zijn uitgevoerd: verdiepingen, baggeren en storten, zandwinning en inpolderingen. De eerder genoemde onderzoeksparameters worden gebruikt om de effecten van deze ingrepen aan te duiden.

Hoofdstuk 5 geeft eerst een synthese van de hoofdstukken 2 tot en met 4. Hierbij wordt aangegeven hoe de systeemkennis kan worden gebruikt ter ondersteuning van de morfologische modellering. Modellen kunnen echter ook worden ingezet ter ondersteuning van het begrip 'morfologisch functioneren' van het Schelde-estuarium. Hiervoor wordt een aantal suggesties gedaan. Voor het sturen van de morfologische ontwikkelingen kan de beheerder gebruik maken van een strategie gericht op het storten van een toelaatbare hoeveelheid sediment op de gewenste locaties. Hierbij kan tevens gebruik worden gemaakt van zandwinning als regelinstrument. Het omgaan met deze kunstmatige sedimentstromen wordt beschreven als onderdeel van het dynamisch sedimentbeheer.

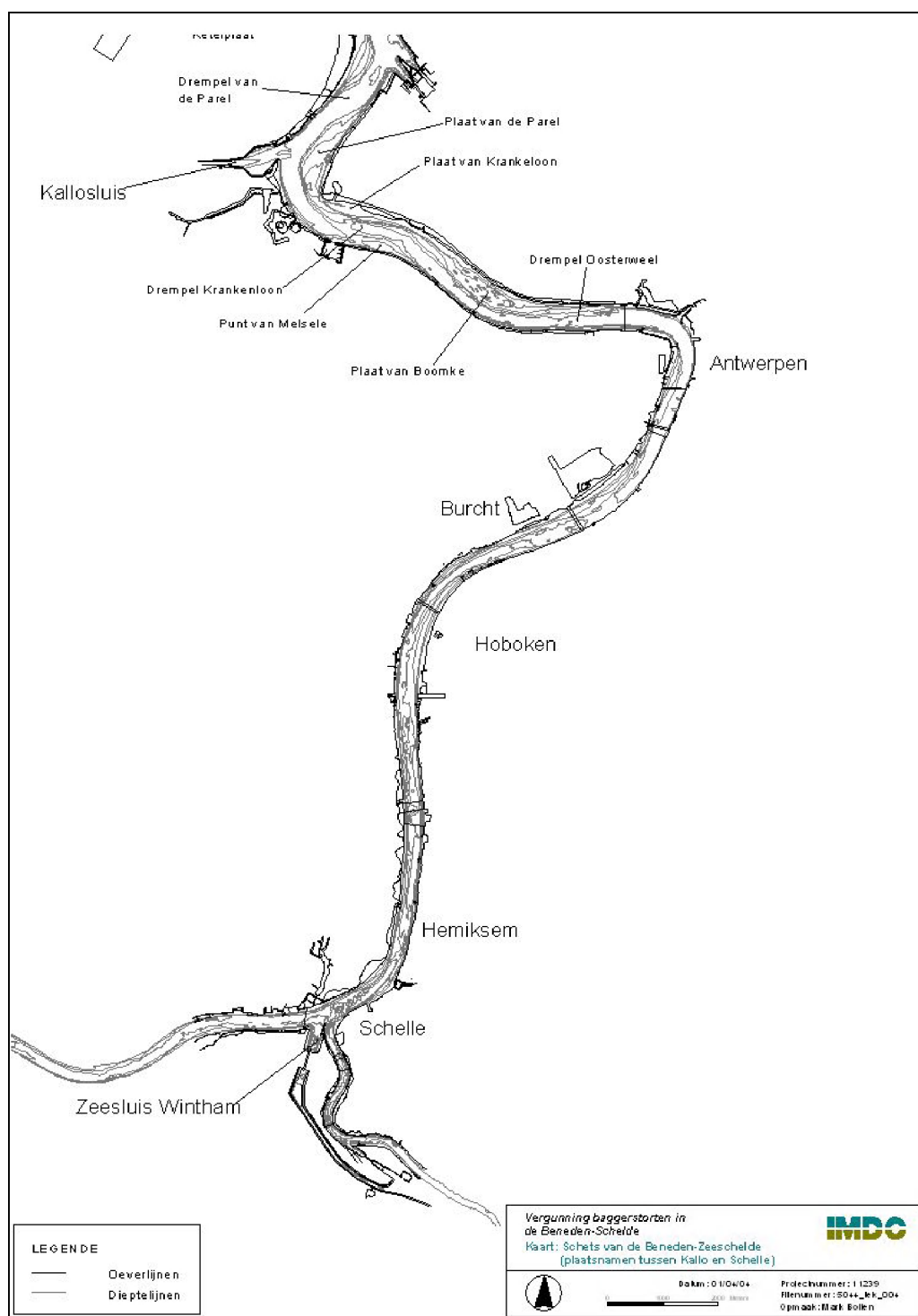
In dit rapport wordt vaak verwezen naar de geografische kenmerken van het estuarium. Figuur 1.1a geeft de belangrijkste topografische benamingen van de geulen in de Westerschelde, terwijl figuren 1.1b en 1.1c de belangrijkste fysische entiteiten respectievelijk afwaarts en opwaarts van de Kallosluis in de Beneden-Zeeschelde weergeven.



Figuur 1.1a: Topografische benamingen Westerschelde

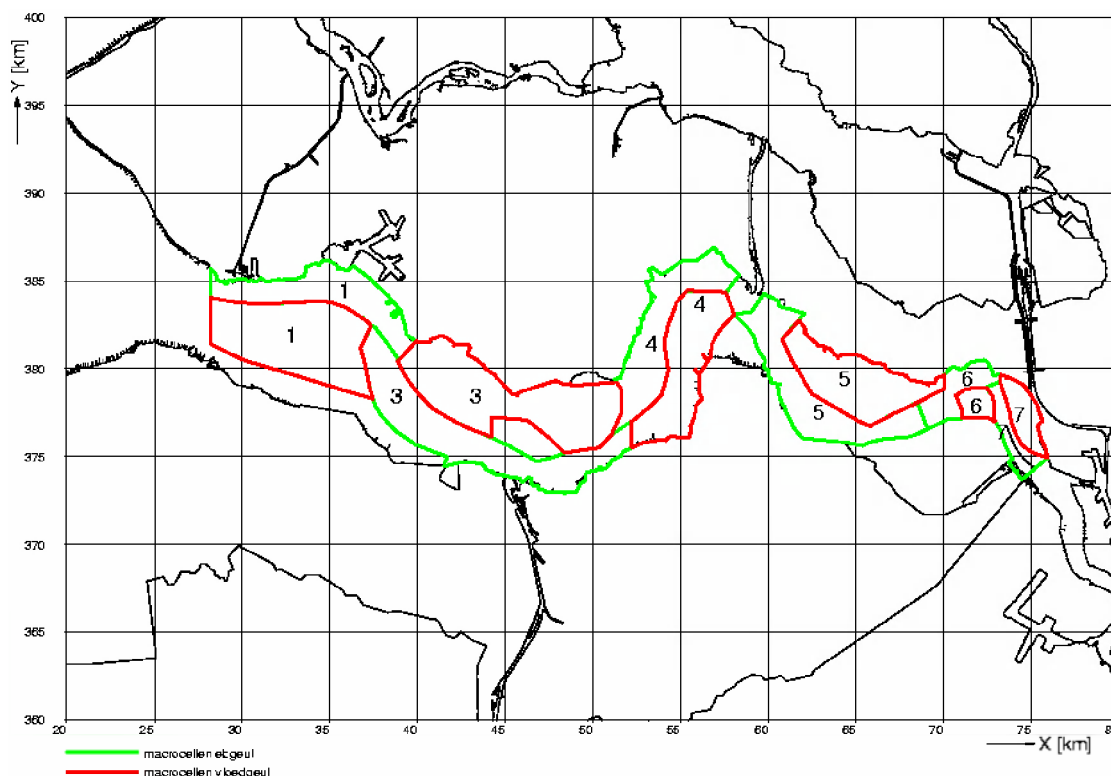


Figuur 1.1.b: Overzicht fysische entiteiten Beneden-Zeeschelde stroomafwaarts Antwerpen (IMDC, 2004)



Figuur 1.1.c: Overzicht fysieke entiteiten Beneden-Zeeschelde stroomopwaarts Kallosluis (IMDC, 2004).

Voor de analyse van het morfologische gedrag van de Westerschelde wordt gebruik gemaakt van een onderverdeling van het gebied in macrocellen (ook genoemd bochtgroepen). Deze onderverdeling is beschreven in Winterwerp, et al. (2000) en vormt de basis voor het Cellenconcept. In figuur 1.2 en tabel 1.1 zijn de eb- en vloedgeulen van de zes macrocellen weergegeven. Het onderscheid tussen eb- en vloedgeulen wordt gemaakt op basis van de morfologische karakteristieken. De ebgeulen vormen een min of meer doorlopende meanderende geul, terwijl de vloedgeulen vanuit de bochten van de ebgeulen zijn ontstaan. De vloedgeulen kunnen tevens worden herkend aan het drempelgebied aan de landwaartse zijde van de geul. Het karakter van de geul kan tevens worden vastgesteld op basis van het eb- en vloedvolume. Voor een ebgeul geldt, dat het ebvolume groter is dan het vloedvolume; voor een vloedgeul geldt het omgekeerde (Van Veen, 1950).



Figuur 1.2: Macrocellen en eb- en vloedgeulen in de Westerschelde.

Macrocel	Ebgeul	Vloedgeul
1	Honte	Schaar van de Spijkerplaat
3	Pas van Terneuzen	Everingen
4	Middelgat	Gat van Ossenisse
5	Zuidergat / Overloop van Valkenisse	Schaar van Valkenisse / Waarde
6	Nauw van Bath	Schaar van de Noord
7	Vaarwater boven Bath	Appelzak

Tabel 1.1: Macrocellen in de Westerschelde.

Intermezzo: Morfologische modellering

Als onderdeel van de milieueffectrapportage voor de derde verruiming van het Schelde-estuarium worden simulaties uitgevoerd met morfologische modellen. Deze simulaties dienen als ondersteuning voor het vaststellen van mogelijke effecten van de verruiming op de morfologie van het systeem. De afgelopen jaren is een grote inspanning gestoken in de ontwikkeling en validatie van morfologische modellen binnen de algemene onderzoekskaders ZEEKENNIS van RIKZ (Kuijper, et al, 2004) en Langetermijnvisie Schelde-estuarium van de Nederlandse en Vlaamse overheden (Kuijper, et al., 2006, Wang en Jeuken, 2006, Cohen en Jeuken, 2006, IMDC, 2006a, IMDC, 2006b). Het uiteindelijke doel is te beschikken over een modelleninstrumentarium waarmee beheers- en onderzoeksvragen voor het Schelde-estuarium kunnen worden beantwoord. Met de genoemde studies zijn de mogelijkheden van de modellen vastgesteld. De huidige kennis van morfologische processen schiet op een aantal terreinen nog te kort. In het algemeen kan worden gesteld, dat aggregatie van resultaten op grotere ruimteschalen leidt tot een toename van de betrouwbaarheid van de voorspellingen op grotere tijdschalen. Hierbij kan een parallel worden getrokken met weers-cq. klimaatvoorspellingen. In het geval van weersvoorspellingen kan in relatieve grote mate van detail worden aangegeven hoe het weer (zon, regen, temperatuur, wind) er op de korte termijn uit zal zien. Echter, voorspellingen hebben een horizon van slechts één week. Met klimaatmodellen worden uitspraken gedaan op termijnen van decaden. Deze hebben echter betrekking op geaggregeerde grootheden, zoals de gemiddelde jaartemperatuur, gemiddelde seizoensneerslag, enzovoort voor grote gebieden (delen van continenten).

Bovenstaande heeft ertoe geleid dat voor morfologische modellering verschillende typen modellen worden ontwikkeld. Procesmodellen, zoals Delft3D, volgen een 'bottom-up' benadering, waarbij de locale processen op een rekenrooster met grote resolutie (orde $100 \times 100 \text{ m}^2$) worden beschreven en vervolgens ruimtelijk worden geaggregeerd. Deze wijze van modellering vertoont een grote overeenkomst met de genoemde modellen voor weersvoorspellingen.

Bij gedragsmodellen, zoals Estmorf, vindt de ruimtelijke schematisatie al op een geaggregeerd niveau plaats en worden processen voor een deel of geheel met semi-empirische vergelijkingen beschreven, welke zijn gebaseerd op kennis en waarnemingen. Deze benadering kan worden vergeleken met voorspellingen zoals die worden uitgevoerd met klimaatmodellen. Op dit moment zijn voorspellingen met morfologische procesmodellen mogelijk op een termijn van 5 à 10 jaren. Onderzoek richt zich momenteel vooral op het verkleinen van onzekerheden en het vergroten van de voorspelhorizon. Daarbij is een belangrijke vraag of de nauwkeurigheid van voorspellingen met procesmodellen op langere tijdschalen een principiële beperking heeft, gelet op de vele niet-lineaire interacties tussen de deelprocessen en het vrije gedrag, dat een systeem kan vertonen. Estmorf kan vooral worden ingezet, om op langere tijdschalen (decennia tot eeuwen) de morfologische veranderingen te beschrijven. Kennis van de mogelijkheden én beperkingen van de modellen is essentieel bij de analyse van de modeluitkomsten. De resultaten van de studies, waarbij de modellen zijn gevalideerd aan de hand van waarnemingen, vormen hierbij het uitgangspunt.

2 Geschiedenis van het estuarium

De historische ontwikkeling van het estuarium wordt uitgebreid beschreven in studies van RIKZ, die uitgevoerd zijn in het kader van de eerdere verruiming: 1967-1979 (eerste verruiming) en 1997-1998 (tweede verruiming). Concreet zijn dit de projecten Oost-west, gericht op het vaststellen van eventuele effecten van de eerste verruiming (Vroon et al, 1997), en het project MOVE, gericht op de monitoring van de effecten van de tweede verruiming (Peters, et al, 2003). Beide studies geven een gedetailleerd beeld van de evolutie van de Westerschelde gedurende de afgelopen eeuw. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het ontstaan van het estuarium, omdat dit voor een groot deel de huidige vorm van het estuarium verklaart. Menselijk ingrijpen heeft hierbij een belangrijke rol gespeeld, in het verleden middels inpolderingen en meer recent door verdiepingen, baggeren en storten en zandwinning. Dit heeft consequenties gehad voor de hydrodynamica, in het bijzonder voor de amplitude en voortplantingsnelheid van het getij. Veranderingen in de waterbeweging hebben hun invloed gehad op de sedimenttransporten en dus ook op de morfologie.

2.1 Ontstaan en ontwikkeling

Oorspronkelijk stroomde de rivier de Schelde van Antwerpen naar het noorden en was de monding gelegen ter plaatse van de huidige Oosterscheldemonding (circa 700 AD). Vanaf 200 AD ontwikkelde zich in het huidige mondingsgebied van de Westerschelde een geulensysteem: de Honte. Tussen 800 AD en 1100 AD ontstond ten noorden van Antwerpen een ondiepe verbinding tussen de Schelde rivier en de Honte. Verdieping van deze verbinding, de toename van het geulsysteem van de Honte door storminvloeden en de natuurlijke opslibbing van de verbinding met de Oosterschelde leidde ertoe dat omstreeks 1500 AD de hoofdafvoer via het Westerscheldegebied ging verlopen, zie figuur 2.1a.

Sinds de 17^e eeuw zijn grote oppervlaktes intergetijdengebied op natuurlijke wijze opgeslibd en vervolgens ingepolderd of bedijkt. De verbinding tussen de Oosterschelde en Westerschelde werd definitief verbroken in 1867-1871 door de aanleg van dammen over de wantijen Kreekrak en Sloe.

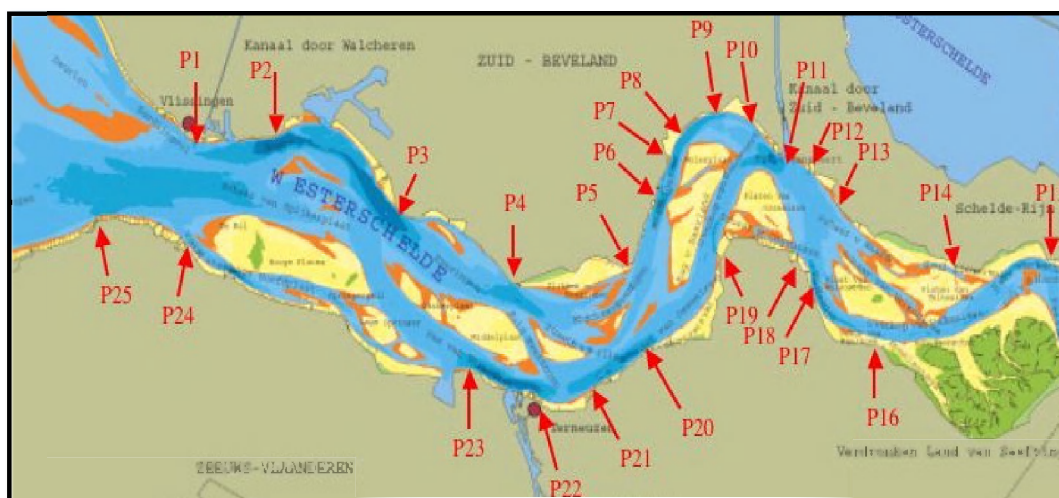
De Westerschelde heeft zich aldus ontwikkeld van een relatief ondiep, sterk vertakt getijdenbekken tot het huidige, onvertakte en diepere estuarium, waarbij een geulsysteem is ontstaan met een meanderende ebgeul en min of meer rechte vloedgeulen (Van der Spek, 2000).



Figuur 2.1a: Schelde-estuarium in de 16e eeuw (De Kraker, 1997).

Waarschijnlijk vindt het bochtige verloop van de Westerschelde zijn oorsprong in de tracés van de oudere geulen van het Honte-getijdenbekken. In de samenstelling van de ondergrond van de Westerschelde en de aangrenzende gebieden kunnen geen directe redenen gevonden worden voor het huidige bochtige verloop van het estuarium² lijken niet direct geologisch bepaald te zijn. In PAET (2004) worden de belangrijkste harde begrenzingen van het estuarium (dijken, kademuren en aanlegsteigers) getoond, zie figuur 2.1b en tabel 2.1a. Ondanks dat vrijwel alle zijtakken van het estuarium verland en vervolgens ingepolderd zijn, is het kronkelige verloop van het estuarium door de verdediging van de oevers grotendeels bewaard gebleven.

² De ophangpunten zijn de harde begrenzingen langs de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde, die de geometrie van het estuarium vastleggen.

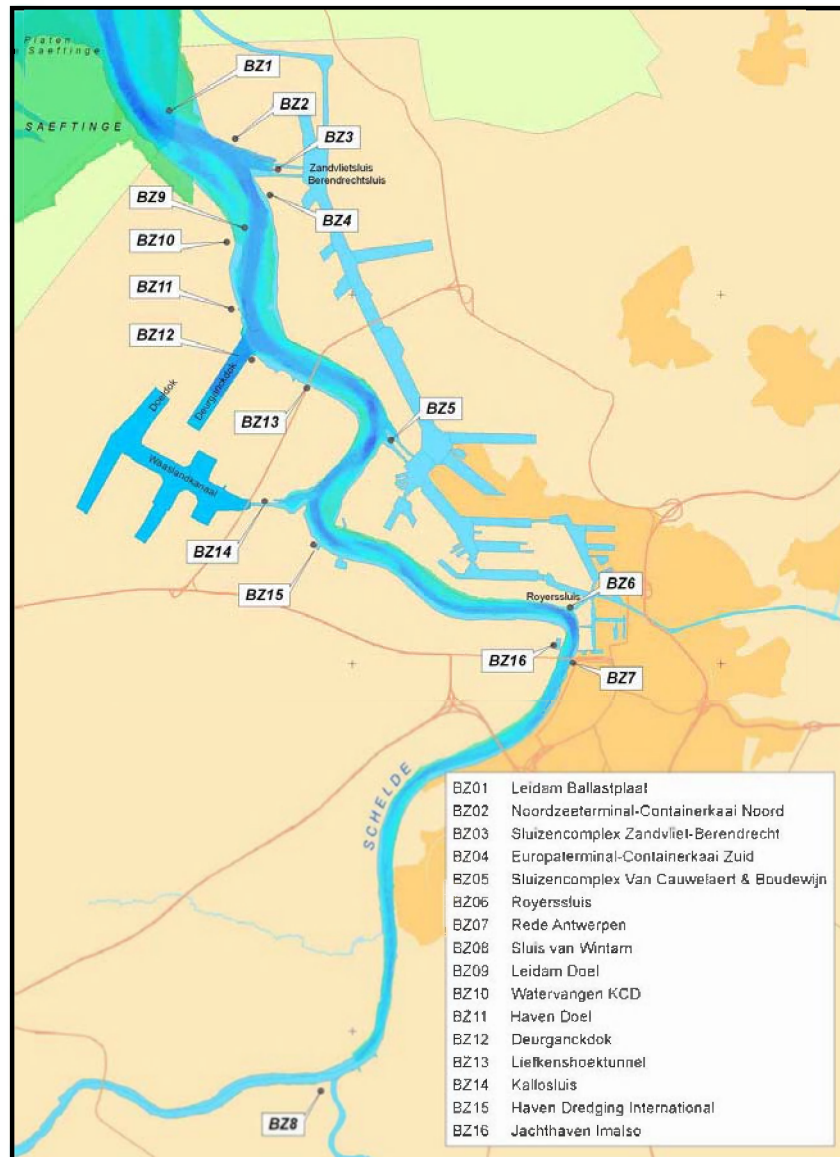


Figuur 2.1b: Belangrijkste harde begrenzingen in de Westerschelde (PAET, 2004).

Nummer	Rechteroever	Nummer	Linkeroever
P1	Vlissingen	P15	Bath
P2	Ritthem – Schone Waardin	P16	Baalhoek
P3	Borssele	P17	Walsoorden
P4	Ellewoutsdijk	P18	Oude Hoofd
P5	Hoek van Baarland	P19	Hoek van Ossenis - Zeedorp
P6	Hoedekenskerke	P20	Eendragtspolder
P7	Biezelingse Ham	P21	Margaretapolder-Griete
P8	's-Gravenpolder	P22	Terneuzen
P9	Eversdijk	P23	Nieuwe Neuzenpolder
P10	Schore	P24	Hoofdplaat
P11	Hansweert	P25	Nummer Een
P12	Kruiningen	P26	Breskens - Voorhaven
P13	Waarde	P27	Nieuwe Sluis
P14	Zimmermanpolder		

Tabel 2.1a: Harde begrenzingen in de Westerschelde (PAET, 2004).

In de Beneden-Zeeschelde is de loop van de rivier in de afgelopen 50 jaar nagenoeg ongewijzigd gebleven. Niettemin hebben de menselijke ingrepen ook in dit deel geleid tot het vastleggen van een min of meer harde begrenzing, gekenmerkt door een strakke bedijking en een aantal harde punten, zoals voorgesteld in figuur 2.1c en tabel 2.1b. In dit overzicht zijn de aanlegsteigers en de historische forten rond Antwerpen niet opgenomen.



Figuur 2.1c: Belangrijkste harde begrenzingen in de Beneden-Zeeschelde (IMDC, 2007).

Nummer	Rechteroever	Nummer	Linkeroever
BZ1	Leidam Ballastplaat	BZ9	Leidam Doel
BZ2	Noordzeeterminal – Containerkaai Noord	BZ10	Watervangen KCD
BZ3	Sluizencomplex Zandvliet-Berendrecht	BZ11	Haven Doel
BZ4	Europaterminal -Containerkaai Zuid	BZ12	Deurganckdok
BZ5	Sluizencomplex Van Cauwelaert en Boudewijn	BZ13	Liefkenshoektunnel
BZ6	Royerssluis	BZ14	Kallosluis
BZ7	Antwerpse Rede	BZ15	Haven Dredging International
BZ8	Sluis van Wintam	BZ16	Jachthaven Imalso

Tabel 2.1b: Harde begrenzingen in de Beneden-Zeeschelde (IMDC, 2006).

2.2 Bodemsamenstelling en invloed op de morfodynamiek

In de ondergrond van de Westerschelde worden Tertiaire, Pleistocene en Oud-Holocene lagen aangetroffen. Hierop liggen onder andere de (sub)recente afzettingen van de geulen van het Honte bekken en de voormalige zijtakken van de Westerschelde. Langs de zuidelijke oevers van Walcheren en Zuid-Beveland komt een (vrijwel) complete opeenvolging van Tertiaire, Pleistocene en Holocene sedimenten voor. Langs de oever van Zeeuws-Vlaanderen liggen de jonge Holocene afzettingen meestal direct op Tertiaire afzettingen. De genoemde oudere afzettingen kunnen in principe aangesneden worden door migrerende geulen in het mondingsgebied. Daarbij lopen zij de kans om op oudere, erosiebestendige afzettingen te stuiten. De invloed van de opbouw van de ondergrond zal zich dan het duidelijkst manifesteren in het geulgedrag, bijvoorbeeld een verbreding van de geul in plaats van een verdieping of het tegengaan van de laterale verplaatsing. Onder enkele schorren en slikken, zoals bij Bath, Saeftinge, Platen van Hulst en de slikken bij Terneuzen worden compacte, erosiebestendige veenlagen aangetroffen (Hollandveen). Elders zijn deze veenlagen verdwenen door geulerosie (Vroon, 1997).

Voor de Tertiaire, maar ook de Pleistocene afzettingen hebben door verkittung van de zanden en als gevolg van sterke consolidatie van de kleien een matige tot (zeer) hoge erosiebestendigheid. Vooral de overgeconsolideerde Boomse Klei is in dit opzicht een belangrijke afzetting. Door hun diepte van voorkomen zullen deze lagen vooral door de diepste delen van migrerende geulen aangesneden worden en een verdere verdieping van de geul (sterk) vertragen, maar op de lange termijn niet tegengaan.

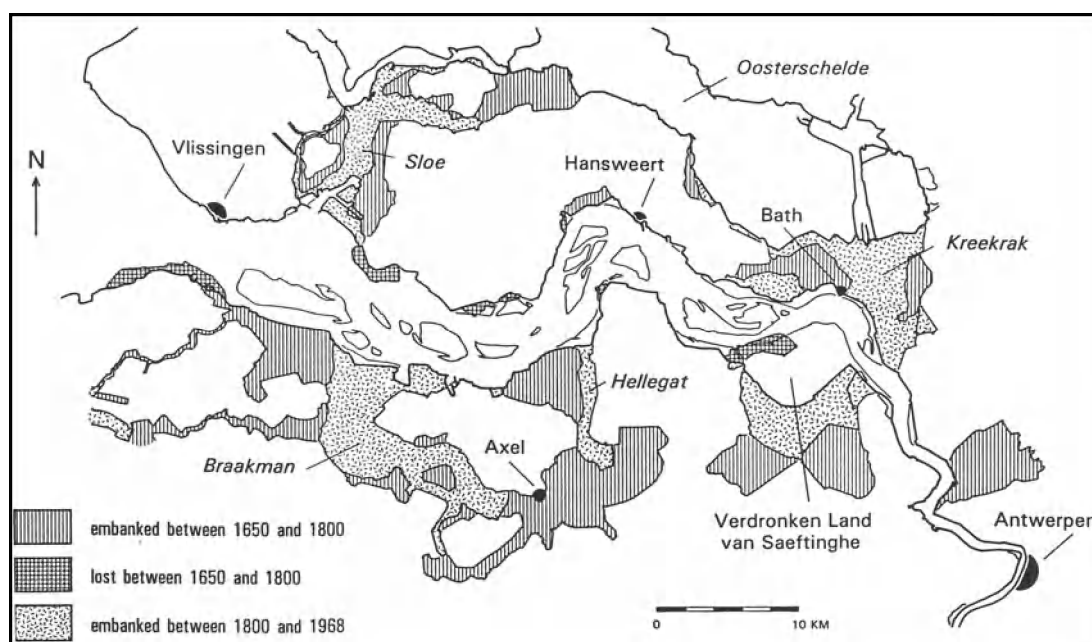
Zo heeft de Pas van Terneuzen tussen de Braakman en de Platen van Hulst zich al tot een maximum van zeven meter ingesneden in de Boomse klei. Ook de Wielingen snijdt ten noordwesten van Breskens, op de overgang naar de Rede van Vlissingen, de Boomse klei aan. Dit betekent dat het diepste deel van de Wielingen hier is vastgelegd en dat een west- en noordwaartse uitbreiding van het diepste deel van de Wielingen sterk bemoeilijkt zal worden. Ondieper voorkomende lagen kunnen de laterale migratie van een geul directer belemmeren. Aangezien het dan meestal om minder sterk geconsolideerde lagen gaat is dit waarschijnlijk slechts van tijdelijke aard. Nabij Vlissingen is de metersdikke schelpenlaag van invloed op de verplaatsing van de Honte.

De conclusie is dat de samenstelling van de ondergrond de morfologische ontwikkeling van de Westerschelde (en de buitendelta) niet kan aansturen, maar wel beïnvloeden (Van der Spek, 2000). De aanwezigheid van moeilijk erodeerbare lagen dient dus zo goed als mogelijk te worden meegenomen in de Milieueffectrapport.

De Beneden-Zeeschelde wordt gekenmerkt door een kleibodem vanaf de Rupelmonding tot de omgeving van Antwerpen (Wartel, 1972). Verder stroomafwaarts komen tertiaire lagen (afzettingen) voor, met achtereenvolgens de zanden van Edegem, Antwerpen, Kattendijk, Kallo, Merksem. Deze lagen worden afgedekt door de laat pleistocene dekzanden.

2.3 Inpolderingen

Het huidige oppervlak van de Westerschelde bedraagt 310 kilometer²; in 1800 was dit nog 1,5 maal groter en in 1600 zelfs tweemaal groter. Figuur 2.2 toont de inpolderingen in de Westerschelde sinds 1650 (Van der Spek, 1994).



Figuur 2.2: Inpolderingen in de Westerschelde sinds 1650 (Van der Spek, 1994).

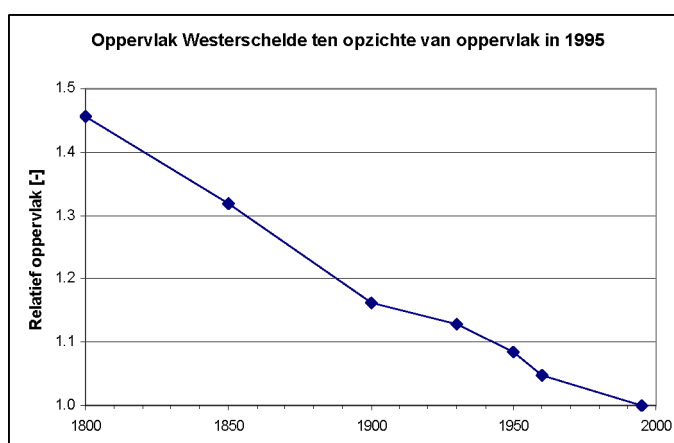
De afname van het oppervlak komt voor rekening van inpolderingen, waarvan de belangrijkste zijn weergegeven in tabel 2.2.

Periode	Sloe/Kaloot	Braakman	Hellegat	Saeftinge	Ossendrecht	Totaal
1800-1850	0,96	24,34	0,54	16,39	-	42,23
1850-1900	5,18	13,94	4,09	10,61	15,15	48,97
1900-1950	4,81	8,35	1,32	3,16	6,20	23,84
1950-1995	2,00	15,25	-	-	8,9	26,15
Totaal	12,95	61,88	5,95	30,16	30,25	141,19

Tabel 2.2: Inpolderingen rond de Westerschelde (kilometer²) sinds 1800. Ontleend aan (Vroon, 1997).

Sinds 1930 is 40 kilometer² ingepolderd, waarvan 14,5 kilometer² na 1960. De grootste inpolderingen betreffen de Braakman (44 procent van het totaal aan inpolderingen sinds 1800), Saeftinge en Ossendrecht (elk 21 procent). In figuur 2.3 is de verandering van het oppervlak van de Westerschelde ten gevolge van de inpolderingen weergegeven ten opzichte van het huidige oppervlak. Op de locaties, waar werd ingepolderd, verdwenen de slikken en schorren (Vroon, 1997). Volgens PAET (2004) zijn inpolderingen de belangrijkste factor geweest voor de morfologische veranderingen in de Westerschelde.

Met betrekking tot de Beneden-Zeeschelde is de historiek van de inpolderingen beschreven in (Guns, 1972) en (De Vree, 1997). In (IMDC, 2007) wordt een overzicht gegeven van de Ferrariskaart van de Beneden-Zeeschelde anno 1778, aangevuld met een reproductie van hydrografische kaart van de Schelde tussen de Rupel en de grens, voor respectievelijk de jaren 1961-1966 en 2005. Hieruit kunnen als belangrijkste inpolderingen over de laatste 50 jaar de volgende werken aangehaald worden: ophoging van de slikken en Schorren van Zandvliet, opspuitingen ten behoeve van de Europaterminal, opspuiten van de Ketenisplaat en opnieuw afgraven ten behoeve van natuurontwikkeling, waarbij ruim 30 hectare slik en schor is gerealiseerd, inname van het slik-schorgebied ter hoogte van Kallo en indijking ter hoogte van Pijp Tabak. Uit recent onderzoek (Van Braeckel, A. et al, 2006) blijkt dat tussen 1992 en 2003 het totaal areaal slik-schorgebied tussen de grens en Antwerpen is gedaald met circa 35 hectare tot 529 hectare. Dit is het resultaat van aangroei, verlies door afslag, natuurontwikkeling en verlies door constructies.



Figuur 2.3: Oppervlak Westerschelde ten opzicht van het oppervlak in 1995.

Omdat de ingepolderde gebieden al voor een deel boven laagwater waren gelegen, zijn de veranderingen in het kombergend volume, bijvoorbeeld het watervolume dat tussen laagwater en hoogwater wordt geborgen, geringer dan de veranderingen van de oppervlakte van de Westerschelde. Inpolderingen kunnen ook van invloed zijn op de getijvoortplantingsnelheid en de getijslag en daarmee eveneens het kombergend volume veranderen. De grootte hiervan hangt onder andere af van de locatie van de inpoldering langs de lengteas van het estuarium.

De komberging is het watervolume dat tussen hoog- en laagwater in het estuarium kan worden geborgen. Voor een relatief lang bekken als de Westerschelde is het vloed- of ebvolume in de mond ongeveer een factor 0,9 maal het kombergend volume (Van Veen, 1950). Het getijvolume is, indien de rivierafvoer kan worden verwaarloosd, de som van het eb- en vloedvolume.

In tabel 2.3 zijn de veranderingen vermeld van komberging in de Westerschelde door inpolderingen, samen met de veranderingen ten gevolge van sedimentatie op en resulterende ophoging van de intergetijdengebieden (met name platen), het getij en de zeespiegelstijging, voor de perioden 1930-1960 en 1960-1990 (Vroon, 1997).

Periode	Inpolderingen	Sedimentatie intergetijden-gebied	Getijslag	Zeespiegelstijging	Totaal
1930-1960	-40	-27	+13	+6	-48
1960-1990	-8	-33	+32	+16	+7
Totaal	-48	-60	+45	+22	-41

Tabel 2.3: Verandering in komberging (miljoen m³) sinds 1930 (Vroon, 1997).

Dronkers (2005) geeft voor de periode 1930-1990 enigszins afwijkende waarden: inpolderingen -60 miljoen m³, sedimentatie -60 miljoen m³, getijslag +35 miljoen m³ en zeespiegelstijging +10 miljoen m³, dat wil zeggen totaal -75 miljoen m³. De reductie in komberging van 41 à 75 miljoen m³ houdt in dat het getijvolume sinds 1930 ongeveer tweemaal meer is afgenomen: 80 à 150 miljoen m³ ofwel 4 à 8 procent van het getijvolume in de mond van de Westerschelde. Een afname in het getijvolume zou resulteren in een afname van het watervolume van de geulen indien direct evenwicht wordt bereikt.

Het evenwichtsoppervlak van een geul is bij benadering lineair afhankelijk van het getijvolume door de geul (Allersma, 1992). Voor de gehele Westerschelde, met een oppervlak van 300 kilometer² en een karakteristieke diepte van 10 meter, zou dit in een toename van het zandvolume van 120 à 240 miljoen m³ resulteren gedurende een periode van 60 jaar ofwel een sediment import van 2 à 4 miljoen m³/jaar. Omdat de morfologie zich niet direct aanpast aan de gewijzigde waterbeweging vormt deze schatting een bovengrens. Na 1960 is de invloed van de inpolderingen op de veranderingen van het kombergend volume afgenomen en zijn de effecten van de getijslag en de zeespiegelstijging toegenomen. De invloed van de sedimentatie op de komberging is ongeveer gelijk gebleven. Het netto effect is een toename van de komberging en dus van het getijvolume, wat leidt tot een toename van het geulvolume en een export van sediment. Er lijkt dus een omslag van importerend naar exporterend gedrag van zand voor het estuarium te zijn opgetreden.

2.4 Verdiepingen

Historische informatie met betrekking tot de diepte van de vaargeul in de Schelde is schaars. (Hoste en Loyaen, 2002) geven op basis van historische Scheldekaarten, afkomstig van de Afdeling Maritieme Schelde volgende ramingen van de diepte op een aantal kritische drempels van de monding tot Antwerpen, zie tabel 2.4.

Anderzijds worden door Theuns (1975) een aantal drempeldieptes aangehaald voor de periode voorafgaand aan de eerste verdieping:

- Scheur (geleidelijk verdiept vanaf 1962) 10,5 meter onder GLLWS
- Borssele 10,6 meter onder GLLWS
- Overloop van Hansweert 10,2 meter onder GLLWS
- Drempel van Hansweert 9,6 meter onder GLLWS

- Drempel van Valkenisse 9,8 meter onder GLLWS
- Drempel van Bath 9,8 meter onder GLLWS en
- Drempel van Zandvliet 10,5 meter onder GLLWS

Segment	Drempel	1890	1905	1922	1937
Westerschelde	Borssele	87	110	108	116
	Baarland	76,5	111	97	95
	Hansweert	54	61	70	76
	Valkenisse	82,5	65,5	64	85
	Bath	75	31	56	83
Zeeschelde	Zandvliet	63,5	32,5	58	94
	Frederik	73,5	56,5	69	82
	Lillo	46,5	34,5	68	81
	De Parel	54,5	35,5	63	90
	Krankeloon	49,5	37,5	56	66

Tabel 2.4: Dieptes in decimeter ten opzichte van GLLWS (Hoste en Loyen, 2002)

Het estuarium heeft twee verdiegingsperioden gekend. Over het exacte begin- en eindtijdstip van de eerste periode bestaat geen eenduidigheid (Kornman, et al, 2002). De eerste verdieping is begonnen eind jaren 60 van de vorige eeuw met het verdiepen ter plaatse van de drempel van Bath en is beëindigd met de verdieping van de drempel van Hansweert, welke tot 1979 duurde (Kornman, et al, 2002). De verdieping heeft in dat geval ongeveer 10 jaren in beslag genomen.

Andere referenties noemen voor de eerste verdieping de periode 1971 tot en met 1975 (Belmans, 1988). Tijdens de eerste verdieping zijn de drempels in de Westerschelde met 2,5 à 3 meter verlaagd tot een streefdiepte van 120 decimeter beneden GLLWS gebracht (~NAP-14,7 meter). Verder wordt door Kornman et al. (2002) geconstateerd dat de drempels in 1981/1982 4 à 5 decimeter extra zijn verlaagd, waarna de diepte weer terug gaat naar de streefdiepte. De reden voor deze extra verdieping is niet bekend. De gebaggerde specie werd zoveel mogelijk teruggestort in het oostelijk deel van de Westerschelde.

De te onderhouden bodemdieptes binnen de vaargeul in de Beneden-Zeeschelde waren als volgt (van afwaarts naar opwaarts) (Belmans, 1995) en (Belmans et al, 1989):

- ter hoogte van de drempel van Zandvliet: GLLWS-12,5 meter,
- ter hoogte van de drempel van Frederik: GLLWS-10,5 meter en verder tot het Kruisschans-complex (dus met inbegrip van de omgeving van het huidige Deurganckdok)
- op de drempel van de Parel: GLLWS-8,5 meter (tot de Kallosluis)
- stroomopwaarts de toegangsgeul van de Kallosluis tot het opwaartse einde van de Rede van Antwerpen wordt door (Belmans, 1988) geen te onderhouden diepte opgegeven.

Voor de tweede verdieping wordt in (Peters et al, 2003; Kornman et al, 2002) de periode juli 1997 tot juli 1998 genoemd. Hierbij is de drempel van Vlissingen in 1999 verdiept en de geulen in de monding pas in 2000. Echter, in 2000 en 2001 is ook nog baggerwerk uitgevoerd in verband met de verbreding van de vaargeul (Meersschaut, pers. comm.). Omdat de geulen niet alleen verdiept maar ook verbreed zijn, wordt in het algemeen gesproken van de tweede verruiming.

De verdieping heeft ertoe geleid dat schepen met een maximale diepgang van 48 voet in één getij vanuit de monding Antwerpen kunnen bereiken en dat schepen met een maximale diepgang van 43 voet in één getij vanuit Antwerpen naar de monding kunnen varen. Schepen met een maximale diepgang van 38 voet hebben een getijongebonden toegang tot de Westerschelde. De verdieping bedroeg 1 à 1,5 meter, waarmee de drempels in de Westerschelde op een diepte van ongeveer NAP-16 meter zijn gebracht en de gegarandeerde diepte in de monding op NAP-17,4 meter (Peters et al, 2003).

Na de tweede verdieping werden de te onderhouden bodemdieptes binnen de vaargeul in de Beneden-Zeeschelde gewijzigd (IMDC, 2001):

- vanaf de Belgisch-Nederlandse grens tot net opwaarts de Europaterminal bedraagt de te onderhouden bodemdiepte GLLWS-13,0 meter (uitzonderingen: 1. Noordzeeterminal: GLLWS-14,0 meter; 2. Europaterminal: GLLWS-14,0 meter);
- stroomopwaarts de Europaterminal tot de toegangsgeul van de Kallosluis bedraagt de te onderhouden bodemdiepte GLLWS-11,0 meter (uitzonderingen zijn: 1. Toegangsgeul Boudewijnsdijk: GLLWS-10,0 meter; 2. Toegangsgeul Van Cauwelaertsluis: GLLWS-9,4 meter);
- stroomopwaarts de toegangsgeul van de Kallosluis tot het opwaartse einde van de Rede van Antwerpen bedraagt de te onderhouden bodemdiepte GLLWS-8,0 meter (uitzonderingen zijn: 1. Toegangsgeul Royersluis: GLLWS-6,0 meter; 2. Staatssteiger: GLLWS-2,0 meter);
- stroomopwaarts het opwaartse einde van de Rede van Antwerpen tot de toegangsgeul van de zeesluis te Wintam neemt de te onderhouden bodemdiepte geleidelijk af van GLLWS-8,0 meter ter hoogte van het einde van de Rede van Antwerpen tot GLLWS-6,0 meter ter hoogte van de zeesluis te Wintam.

Sinds de ingebruikname van het Deurganckdok gelden de volgende dieptes (IMDC, 2004):

- ter hoogte van de drempel van Zandvliet: GLLWS-13,3 meter;
- ter hoogte van de drempel van Frederik: GLLWS-13,0 meter;
- ter hoogte van de Noordzee- en Europaterminal: GLLWS-14,0 meter;
- ter hoogte van het Deurganckdok is er een zwaaizone met een breedte van 500 meter welke een diepte van GLLWS-13,3 meter heeft;
- stroomopwaarts het Deurganckdok blijven de te onderhouden dieptes behouden.

2.5 Baggeren en storten

2.5.1 Algemene historiek

De natuurlijke dieptes in het Schelde-estuarium zijn onvoldoende om een vrije scheepvaart te kunnen waarborgen voor de zeer grote en moderne internationale scheepvaart. Zonder baggerwerken zou de natuurlijke diepte op de verschillende drempels in Westerschelde en Beneden-Zeeschelde variëren tussen 5 en 9 meter onder laag water. Daarom werd de vaargeul tijdens de afgelopen 50 jaar regelmatig aangepast aan de noden van de scheepvaart. Deze aanpassingen bestonden onder meer uit lokale verdiepingen en verbredingen van de scheepvaartgeul. Om de breedte en diepte van de vaargeul naar de haven van Antwerpen te kunnen waarborgen zijn er echter permanente onderhoudsbaggerwerken noodzakelijk in de Westerschelde op Nederlands grondgebied en in de Beneden-Zeeschelde op Belgisch grondgebied.

De geschiedenis van de baggerwerken gaat terug tot het begin van de twintigste eeuw. De eerste baggerwerken werden gerealiseerd in 1885 op de drempel van Krankeloon met het oog op de instandhouding van de geul naar de Scheldekaaien. Deze kaaien op de rechteroever werden rechtgetrokken over een lengte van ongeveer 3,5 kilometer tussen 1878 en 1881, en in een tweede fase over 2 kilometer in 1895, waarbij de thalweg van de rivier, met een beoogde diepte van 8 meter onder laagwater en een breedte van 350 meter, langsheen de kaai ging liggen en waarbij er zich een drempel vormde, De Rug genoemd, met een diepte van 6 meter onder laagwater (Meyvis, 1977). In 1907 werd de kaaimuur naar het zuiden verlengd. Sinds 1890 kan er van min of meer systematische onderhoudsbaggerwerken gesproken worden met een jaarlijkse frequentie waarbij er tot de eerste wereldoorlog 1 à 2 miljoen m³ per jaar gebaggerd werd. Vanaf 1902 werd er op de drempel van Zandvliet gebaggerd; vanaf 1905 werd ook op Nederlands grondgebied gebaggerd (Drempel van Bath) en al vanaf 1907 op de Drempel van Valkenisse. Op Belgisch grondgebied werd tijdens de afgelopen 115 jaar (tot en met 2005, uit de jaarlijkse verslagen baggeractiviteiten Afdeling Maritieme Toegang) in het totaal reeds meer dan 200 miljoen m³ gebaggerd of gemiddeld circa 2 miljoen m³ per jaar, met een minimum van 1 en een maximum van 4,1 miljoen m³/jaar. Meer details (tot 1987) kunnen worden gevonden in Belmans (1988).

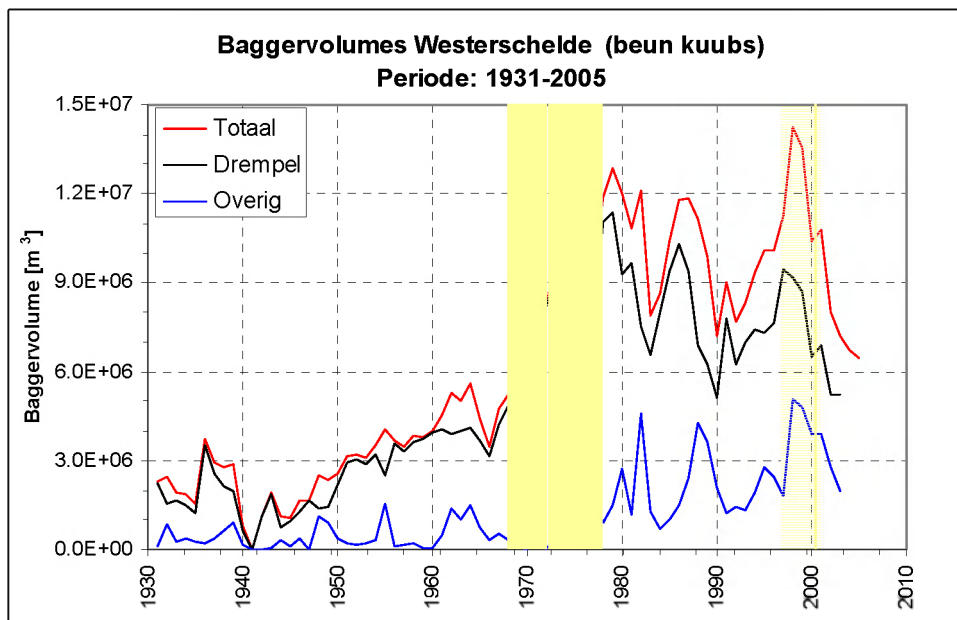
Na de eerste wereldoorlog was er een terugval tot circa 0,5 miljoen m³/jaar, maar vanaf 1928, toen de Kruisschanssluis gebouwd werd, stegen de onderhoudsvolumes tot 3 à 4 miljoen m³/jaar waarvan 1 miljoen op Belgisch grondgebied. Na 1950 tot aan de bouw van de Boudewijnsdijk in 1960 steeg het volume tot 5 à 7 miljoen m³/jaar waarvan circa 2 miljoen m³ op Belgisch grondgebied. In deze periode werd jaarlijks 1 à 1,5 miljoen m³ opgespoten ten behoeve van stadsuitbreiding; meestal op de linker Scheldeoever. Na 1960 groeide de hoeveelheid baggerwerken geleidelijk met als significant jaartal 1967 toen de Zandvlietsluis geopend werd, die op dat ogenblik de grootste ter wereld was. De onderhoudsbaggerwerken werden geïntensiveerd en er werd overgeschakeld van dagregime op een doorlopend werkregime gedurende 5 dagen per week (120 uur). Globaal stegen de jaarlijkse onderhoudsbaggerwerken in deze periode tot 14 à 15 miljoen m³.

Op Belgisch grondgebied was er in de periode 1967 tot 1971 een significante stijging te merken tot circa 10 miljoen m³ maar nadien daalde het volume onderhoudsbaggerwerk in België naar 2 à 3 miljoen m³. Gemiddeld werd tijdens deze periode circa 4 miljoen m³/jaar gebaggerd op Belgisch grondgebied.

2.5.2 De baggerwerken in de Westerschelde

Tot de tweede verruiming werd vanuit economische motieven zo dicht mogelijk bij de baggerlocaties gestort, en uit kwaliteitsoverwegingen werd zo weinig mogelijk specie naar het westen gebracht. De volgorde voor het storten was (Kornman et al, 2002): (i) storten in de nevengeulen om de stroming zoveel mogelijk te concentreren in de ebgeul, (ii) storten in de buitenbochten van de hoofdebgeul om bochterosie tegen te gaan en (iii) storten op westelijker gelegen locaties indien de stortcapaciteit in het oosten te klein bleek te zijn. Door de gevolgde stortstrategie trad een vermindering van natuurlijke dynamiek op en een verlies aan diversiteit van ecotopen (Vroon et al, 1997). Verder werd verwacht, dat door de tweede verruiming de stortcapaciteit in het oostelijke deel onvoldoende zou zijn. Dit heeft ertoe geleid, dat na de tweede verruiming het onderhoudsbaggervolume grotendeels in het midden en westen werd gestort. De doelstellingen van deze nieuwe strategie waren: (i) herstel van de dynamiek in het oosten en (ii) vermindering van het onderhoudsbaggerwerk in het oosten.

Baggervolumes voor de periode 1931-2005 zijn weergegeven in figuur 2.4. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de gebaggerde hoeveelheden op de drempels en in overige gebieden zoals langs plaatranden. De beide verruimingsperioden zijn eveneens in de figuur weergegeven.



Figuur 2.4: Baggervolumes in de Westerschelde voor de periode 1931 tot en met 2005.

Tussen 1945 en 1965 neemt het totale baggervolume in de Westerschelde toe van ongeveer 1 miljoen m³/jaar tot 5 miljoen m³/jaar, waarvan het merendeel (85 procent) op de drempels. De eerste verruiming leidt tot een stijging van het totaal van aanleg- én onderhoudsvolume tot maximaal bijna 12 miljoen m³/jaar op de drempels (in 1975) en maximaal 4 miljoen m³/jaar in de overige gebieden. Het maximale jaarlijkse baggervolume tijdens de verruiming bedroeg 14 miljoen m³/jaar (in 1976).

Na de eerste verruiming is er sprake van een geleidelijke afname van het onderhoudsbaggerwerk tot ongeveer 8 miljoen m³/jaar in 1990, wat vooral het gevolg is van verminderd baggeren op de drempels. Daarna, tot het begin van de tweede verruiming in 1997, lijkt het baggervolume weer toe te nemen tot 10 miljoen m³/jaar. Tijdens de tweede verdiepingsperiode stijgt het totale baggervolume, dat is ten gevolge van het onderhoud en de aanleg, tot maximaal 14 miljoen m³/jaar in 1998.

Na de verdieping neemt het totale baggervolume geleidelijk af van 8 miljoen m³/jaar in 2002 tot 6,5 miljoen m³/jaar in 2005. Hiermee is het totale onderhoudsvolume weer bijna op het niveau van voor de eerste verruiming (5,6 miljoen m³/jaar in 1964), wat na de beide verdiepingen opmerkelijk is. Zowel na de eerste als de tweede verdieping neemt het onderhoudsvolume af, al zijn de jaarlijkse variaties groot en is de waarnemingsreeks van vier jaren na de tweede verdieping nog kort. Het onderhoudsvolume in de gebieden buiten de drempels ligt na de eerste verruiming wel op een hoger niveau dan tijdens de periode ervoor. Ook lijkt het baggervolume in deze gebieden sinds 1980 geleidelijk toe te nemen.

2.5.3 Baggerwerken in de Beneden-Zeeschelde

Tot 1970 werd een belangrijk deel van de (Belgische) gebaggerde specie uit de rivier verwijderd en gebruikt voor opspuitingswerken, maar vanaf 1975 daalde het opgespoten volume snel, omdat de zandbehoeften in het havengebied min of meer wegvielen. Dit impliceert dat in deze periode de verdieping/verruiming niet het doel van de baggerwerken was, wel het gevolg van zandwinning voor havenuitbreiding ten noorden van Antwerpen.

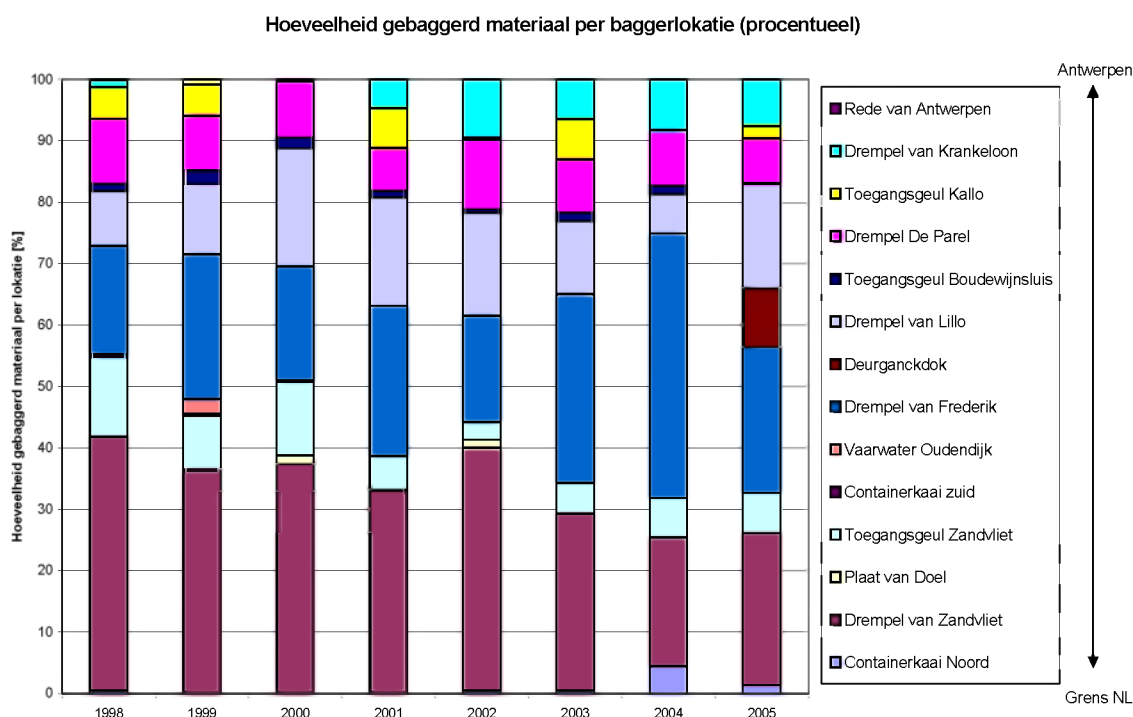
Vanaf 1980 bedroeg het volume onderhoudsbaggerwerk op Belgisch grondgebied ongeveer 2,5 miljoen m³ tijdens de tachtiger jaren en 2,3 miljoen m³ tijdens de jaren negentig – het betreft het geheel van de zandrijke en de slibrijke specie. Een overzicht van de jaarlijkse hoeveelheden wordt gegeven in tabel 2.5.

PERIODE	Drempel van Zandvliet	Plaat van Doel	Drempel van Frederik	Drempel van Lillo	Drempel van De Parel	Diverse	Opwaarts Kallo	TOTAAL
GEBAGGERDE HOEVEELHEID PERIODE 1998-2005 (miljoen m³/JAAR)								
1998	1,4	0,0	0,6	0,3	0,4	0,7	0,0	3,5
1999	1,3	0,0	0,9	0,4	0,3	0,7	0,0	3,6
2000	1,1	0,0	0,6	0,6	0,3	0,4	0,0	3,0
2001	1,4	0,0	1,0	0,7	0,3	0,7	0,0	4,1
2002	1,5	0,0	0,6	0,6	0,4	0,5	0,0	3,7
2003	1,0	0,0	1,0	0,4	0,3	0,7	0,0	3,4
2004	0,6	0,0	1,2	0,2	0,2	0,6	0,0	2,8
2005	0,9	0,0	0,9	0,7	0,3	1,0	0,0	3,8
GEBAGGERDE HOEVEELHEID: GEMIDDELDE, MINIMUM EN MAXIMUM VOOR DE PERIODE 1998-2005 (miljoen m³/JAAR)								
Gemiddeld per jaar (1998-2005)	1,1	0,0	0,8	0,5	0,3	0,7	0,0	3,5
minimum (1998-2005)	0,6	0,0	0,6	0,2	0,2	0,4	0,0	2,8
maximum (1998-2005)	1,5	0,0	1,2	0,7	0,4	1,0	0,0	4,1

Tabel 2.5: Overzicht van de baggerhoeveelheden in de Beneden-Zeeschelde (1998-2005).

Tijdens de laatste jaren ligt het gemiddelde volume op 3 a 3,5 miljoen m³/jaar. De voornaamste baggerlocaties zijn de drempels, waarvan de drempel van Zandvliet en de drempel van Frederik de voornaamste zijn. Als men de gegevens (zie figuur 2.5) voor de periode tussen 1998 en 2005 bekijkt, is het duidelijk dat de verhoudingen tussen de verschillende baggerlocaties ongeveer gelijk blijven. De baggerwerken op de Drempel van Krankeloon worden iets belangrijker, de baggerwerken in het Vaarwater van Oudendijk verdwijnen na 2000. Vanaf 2005 wordt er ook gebaggerd in het Deurganckdok.

De drempels van Zandvliet en Frederik, samen met de Drempel van Lillo, leveren de voornaamste bijdrage tot het totale volume onderhoudsbaggerspecie.



Figuur 2.5: Procentuele bijdrage van de individuele baggerlocaties tot het totaal aan gebaggerd materiaal voor de periode 1998-2005.

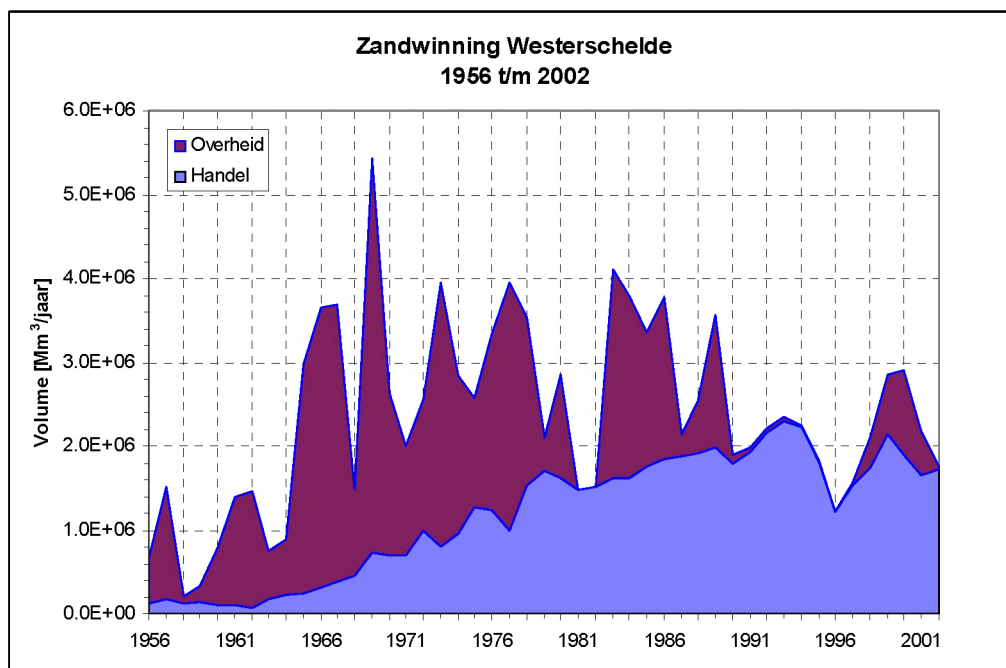
Tabel 2.6 geeft een overzicht van de geklepte hoeveelheden baggerspecie tijdens de periode 1998 tot 2005. Het laatste paar jaren, sinds 1997-1998 ligt het totaal geklepte volume rond 3,5 miljoen m³. In deze tabel betekent Plaat van Boomke het totaal van het stortgebied (met inbegrip van de gestorte hoeveelheid in de zone Punt van Melsele). Belangrijk is op te merken dat de Schaar van Ouden Doel gebruikt wordt voor het kleppen van zand, terwijl de locaties opwaarts de Kallosluis gebruikt worden voor slibrijke specie.

PERIODE	Schaar van Ouden Doel	Plaat van Boomke	Andere bestemming	Opwaarts Kruisschans	TOTAAL
GESTORTE HOEVEELHEDEN VOOR DE PERIODE 1998-2005 (IN miljoen m³JAAR)					
1998	2,6	0,7	0,2	0	3,5
1999	2,3	1,2	0,2	0	3,6
2000	1,8	1,2	0,0	0	3,0
2001	0,6	2,7	0,8	0	4,1
2002	0,8	2,9	0,0	0	3,7
2003	0,9	2,3	0,2	0	3,4
2004	0,3	1,3	1,5	0	3,1
2005	1,8	1,8	0,3	0	3,8
GEMIDDELDE, MAXIMUM EN MINIMUM VOOR DE PERIODE 1998-2005 (miljoen m³/JAAR)					
Gemiddeld per jaar (1998-2005)	1,4	1,7	0,4	0	3,5
minimum (1998-2005)	0,3	0,7	0,0	0	3,0
maximum (1998-2005)	2,6	2,9	1,5	0	4,1

Tabel 2.6: Overzicht van de gestorte hoeveelheden (miljoen m³) voor de verschillende stortlocaties (1998-2005).

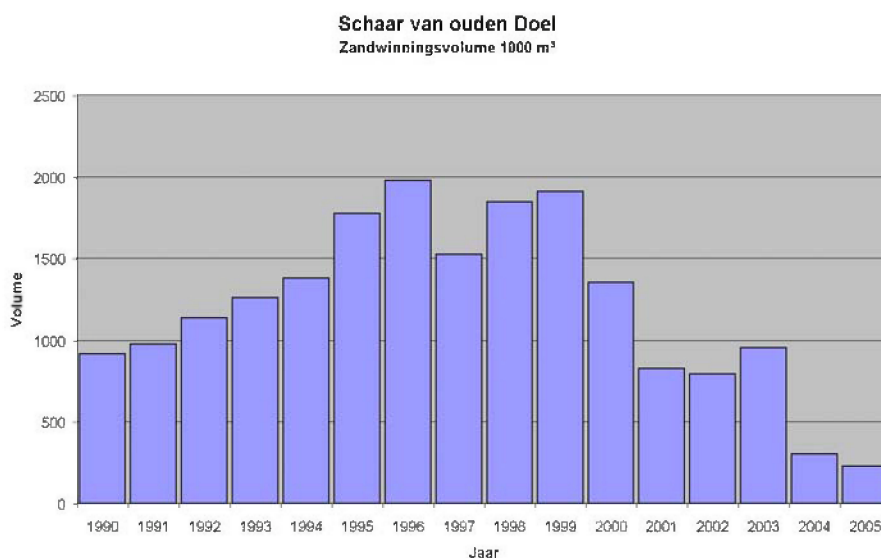
2.6 Zandwinning

In de Westerschelde wordt zand gewonnen door de zandhandel en door de Belgische en Nederlandse overheid. Jaarlijkse hoeveelheden zijn weergegeven in figuur 2.6, waarbij de totale zandwinning door handel en overheid is weergegeven door de bovenste lijn. De gemiddelde jaarlijkse zandwinning voor de periode 1956 tot en met 2002 bedraagt 2,4 miljoen m³/jaar; in totaal is een hoeveelheid zand met een volume van ongeveer 120 miljoen m³ aan de Westerschelde onttrokken. Deze hoeveelheid correspondeert met een gemiddelde bodemverlaging van 0,4 meter voor de gehele Westerschelde. Vanaf 1993 is de maximaal, toegestane hoeveelheid 2,6 miljoen m³/jaar. De zandwinning concentreert zich vanaf 1991 in het oostelijke deel van de Westerschelde, terwijl daarvoor voornamelijk zand werd gewonnen in het westelijke deel (Peters et al, 2003). De verschuiving van de zandwinning van west naar oost valt samen met de omslag van netto zandimport naar zandexport in de monding van de Westerschelde, zie paragraaf 2.10. In hoeverre sprake is van een oorzakelijk verband, is niet duidelijk. Overigens wordt er al zand aan de Westerschelde onttrokken sinds het eind van de 19^e eeuw (pers. comm. Malherbe).



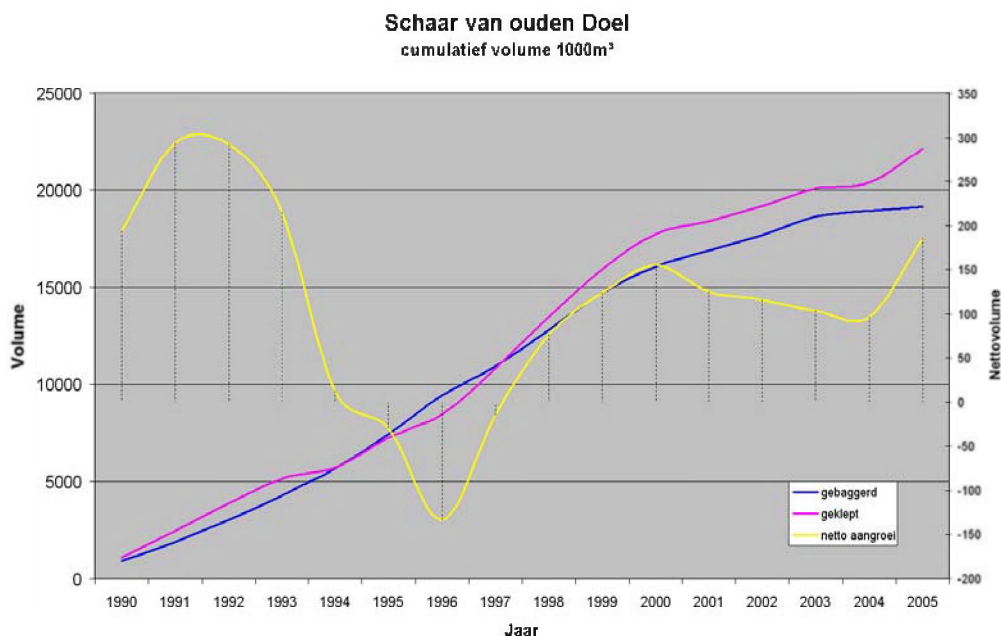
Figuur 2.6: Zandwinning in de Westerschelde gedurende de periode 1956 tot en met 2002.

In de Beneden-Zeeschelde is zandwinning (voor commerciële doeleinden) gangbaar op de zandwinplaats de Schaar van Ouden Doel. De jaarlijkse volumes zijn sterk toegenomen in de tachtiger jaren tot 1 miljoen m³, ze bereiken een piek omstreeks 1996 met bijna 2 miljoen m³ en neemt dan vervolgens sterk af tot slechts 200.000 m³ in 2005. De zandverwijdering ten behoeve van infrastructuurwerken, zoals het uitgraven van Containerkaai Zuid of het uitgraven (en heraanvullen) van de sleuf voor de Liefkenshoektunnel in het begin van de jaren negentig, zijn hierin niet opgenomen. De volumes ten behoeve van zandwinning zijn weergegeven in figuur 2.7.



Figuur 2.7: Zandwinning in de Beneden-Zeeschelde gedurende de periode 1990 tot en met 2005 (IMDC, 2007).

Indien de zandwinning over de periode 1990-2005 vergeleken wordt met de geklepte zandhoeveelheden, dan bemerken we een netto gestort volume van circa 4 miljoen m³ of gemiddeld ongeveer 250.000 m³ op jaarbasis, zie figuur 2.8.



Figuur 2.8: Cumulatieve volumes zandwinning en geklept zand in de Schaar van Ouden Doel (IMDC, 2007).

2.7 Leidammen

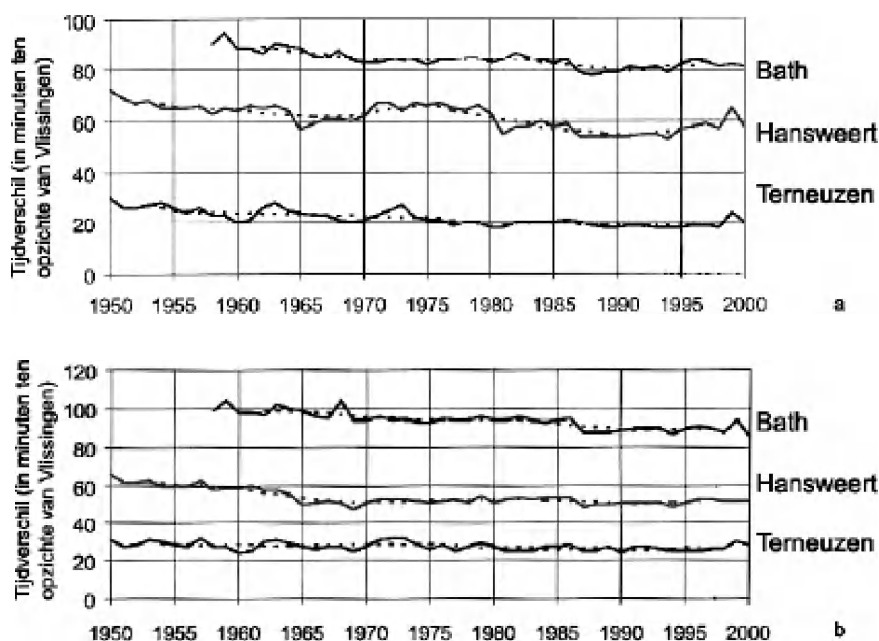
In de zestiger jaren werd het leidammenproject onderzocht in het Waterbouwkundig Laboratorium te Borgerhout (Mod 119). Het project had als doel om de ebstroom te concentreren en de vloedstroom in de scharen te beteugelen en om zo door een groter uitschuringseffect grotere natuurlijke diepten in stand te houden en bovendien om (voor de scheepvaart) ongunstige natuurlijke geulevoluties te bestrijden. In de periode 1966/69 werd de eerste leidam aangelegd, met name de Leidam op de Plaat van Doel (Meyvis, 1977 en Technische Scheldecommissie, 1984). De dam werd aangelegd op de opwaartse zijde van de Plaat van Doel en is nagenoeg 2 kilometer lang. Het kruinpeil aan de dijk aansluiting lag op TAW+5,9 meter, snel afnemend naar TAW+0,9 meter. Volgens Meyvis (1977) heeft deze leidam de resultaten die men er van verwachtte, ingelost: "het geregulariseerde vaarwater van Oudendijk onderging als gevolg van de leidam een algemene verdieping". De verhoopte instandhouding van de diepte op de Drempel van Zandvliet is evenwel niet mogelijk gebleken.

Tussen 1968 en 1971 werd eveneens de leidam op de Ballastplaat aangelegd. De totale lengte is nagenoeg 3 kilometer, de aansluiting aan de dijk lag bij aanleg op TAW+7,6 meter en de kop op TAW-0,1 meter. De dam werd in afwijking van de modelproeven verlengd naar afwaarts en verplaatst naar het oosten (dus verder op de plaat). Eveneens volgens Meyvis (1977) is het voor de Leidam van de Ballastplaat moeilijk uit te maken welke invloed hij uitgeoefend heeft op de diepten in de Schelde.

Wel werd een aanzienlijke aanzanding ten oosten van de leidam vastgesteld en werd aan het afwaartse einde belangrijke uitschuringen geconstateerd.

2.8 Evolutie van de hydrodynamica

In de 17^e eeuw bedroeg de tijdsduur van de voortplanting van hoog- en laagwater van Vlissingen naar Antwerpen ongeveer 5 uur; in 1900 was dit afgenomen tot 2,5 uur en momenteel is dit ongeveer 2 uur. (Dronkers, 2005). Sinds 1950 is het tijdverschil tussen de hoogwaters in het estuarium (Terneuzen, Hansweert en Bath) en het hoogwater te Vlissingen afgenomen met ongeveer 10 minuten (10 à 30 procent), zie figuur 2.9. De voortplantingsnelheid van de getijgolf is dus toegenomen, wat het gevolg kan zijn geweest van inpolderingen, afname van het areaal intergetijdengebieden en verdiepingen van de geulen. Dit lijkt met name te zijn opgetreden tussen Vlissingen en Terneuzen. Op tijdschalen van 5 à 10 jaar kan er echter ook sprake zijn van een toename van het tijdverschil. Voor de laagwaters zijn de veranderingen in het tijdverschil ten opzichte van Vlissingen ook ongeveer 10 minuten.



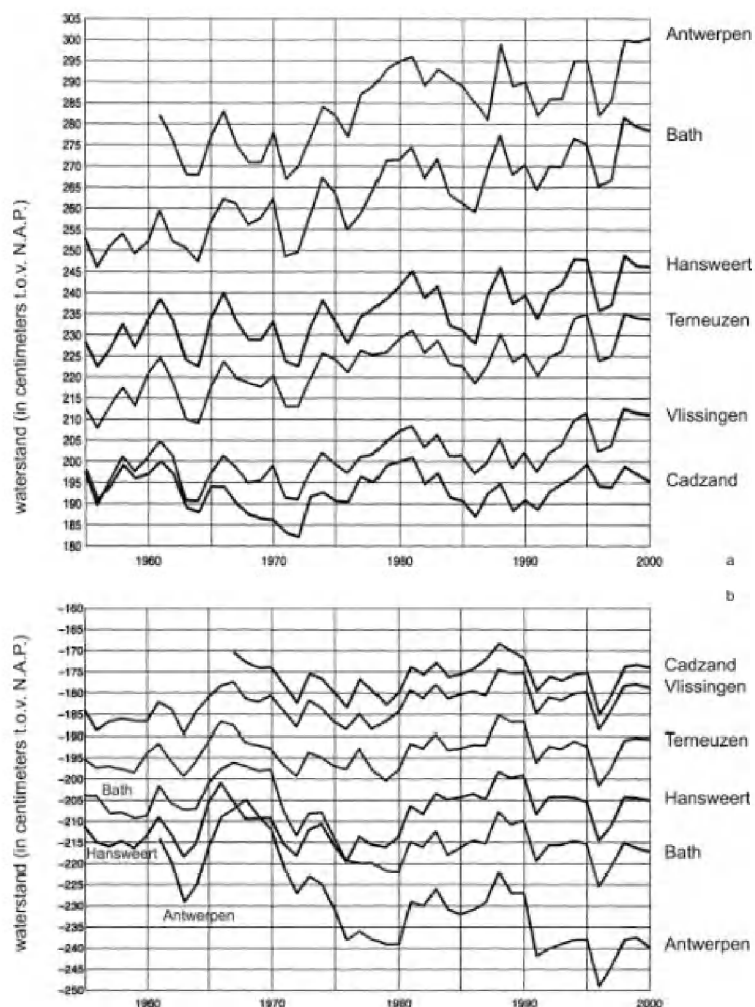
Figuur 2.9: Boven: Tijdverschil tussen hoogwater te Bath, Hansweert en Terneuzen en hoogwater te Vlissingen. Onder: idem laagwater. Kramer (2002).

Ook Vroon (1997) noemt, dat de looptijd van het hoogwater tussen Vlissingen en Hansweert gedurende de periode 1935-1985 met ongeveer 10 minuten is afgenomen; voor Antwerpen is de afname sinds 1895 zelfs 40 minuten (28 procent). Een toename van de voortplantingsnelheid leidt tot een efficiëntere vulling van het estuarium en daarmee tot een vergroting van het getijvolume en dus de stroomsnelheden.

1. Veranderingen hoog- en laagwater en getijslag

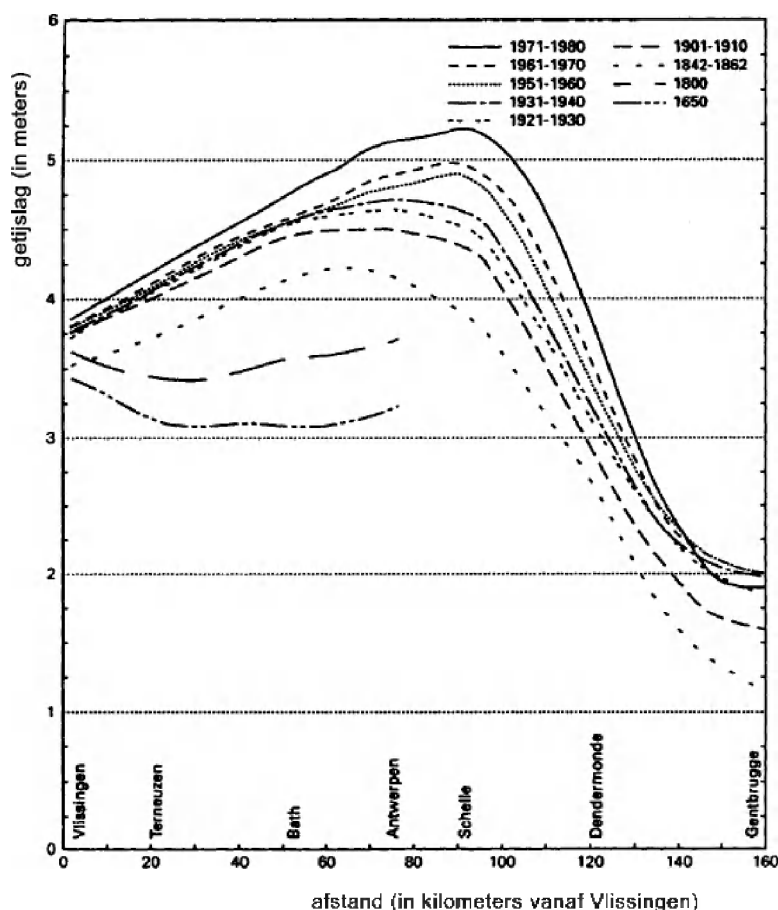
De veranderingen van de jaargemiddelde hoog- en laagwaters zijn weergegeven in figuur 2.10. In het algemeen kan worden gesproken van een toename van de hoogwaters in het estuarium sinds 1955. Deze toename bedraagt 15 centimeter te Vlissingen en ongeveer 25 centimeter te Bath en Antwerpen. De veranderingen in de laagwaters zijn minder groot: een verhoging van 5 centimeter te Vlissingen en een verlaging van 10 centimeter te Bath en 25 centimeter te Antwerpen. Hoewel de jaarlijkse variaties groot zijn, lijken de grootste veranderingen te zijn opgetreden tussen 1970 en 1980. Dit geldt voor de hoogwaters en voor de laagwaters te Bath en Antwerpen.

Tijdens deze periode is de eerste verdieping gerealiseerd, zodat mogelijk sprake is van een oorzakelijk verband. Ook zijn in 1967 de leidammen Ballastplaat en Schaar van Ouden Doel aangelegd. De eventuele effecten hiervan op het verticale getij zouden dan echter meer een direct, en permanent, karakter hebben.



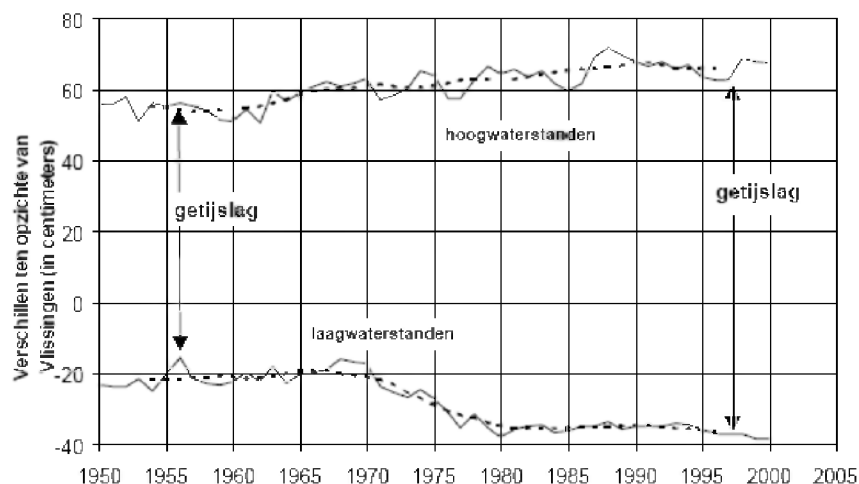
Figuur 2.10: Veranderingen van de jaargemiddelde hoog- en laagwaterstanden (in Kramer, 2002; Dekker, 2001).

De verandering van de getijslag is weergegeven in figuur 2.11. Tussen 1900 en 1980 is de toename 15 centimeter te Vlissingen en 35 centimeter te Bath, waarvan ongeveer de helft gedurende de periode 1971-1980. Dit betekent dat in de Westerschelde de jaarlijkse veranderingen tussen 1971 en 1980 ongeveer zevenmaal groter zijn geweest dan tijdens de voorafgaande 70 jaren. In Antwerpen is de getijslag tussen 1900 en 1980 met 60 centimeter toegenomen, waarvan 25 centimeter tussen 1971 en 1980.



Figuur 2.11: Verandering van de getijslag in het Schelde-estuarium. (in Kramer, 2002: Van den Berg et al, 1996). Figuur gebaseerd op oorspronkelijke publicatie van Coen (1988).

De verandering van de getijslag in het oostelijke deel van de Westerschelde ten opzichte van Vlissingen wordt getoond in figuur 2.12a. Hierin komt duidelijk naar voren dat de toename van de getijslag (20 centimeter ten opzichte van Vlissingen) vooral wordt veroorzaakt door de verandering in het laagwater en dat de periode, gedurende welke de veranderingen zich manifesteren, samenvalt met de eerste verdieping. Overigens neemt de getijslag te Bath al toe sinds 1860 (0,3 meter tot 1970) (zie figuur 2.2.3 in Vroon, 1997).



Figuur 2.12a: Gemiddeld verschil tussen de hoog- en laagwaterstanden in het oostelijk deel van de Westerschelde en de hoog- en laagwaterstanden bij Vlissingen (Kramer, 2002).

In Peters et al. (2003) wordt eveneens geconstateerd dat na de tweede verruiming de laagwaters meer zijn gedaald dan in de periode ervoor; voor de hoogwaters is sprake van een toename maar niet significant meer dan tijdens de voorafgaande periode. Dit houdt in dat de verticale getijslag is toegenomen ten gevolge van de tweede verruiming.

Vroon (1997) geeft eveneens de veranderingen in de hoog- en laagwaters en de getijslag in de Westerschelde. Deze waarden betreffen de veranderingen *per eeuw*, gebaseerd op waarnemingen tussen 1940 en 1980, zie onderstaande tabel.

Station	Verandering gemiddelde waterstand (cm/eeuw)	Verandering hoogwater (cm/eeuw)	Verandering laagwater (cm/eeuw)	Verandering getijslag (cm/eeuw)
Vlissingen	+17	+29	+14	+15
Terneuzen	+26	+42	+14	+28
Hansweert	+24	+43	+22	+21
Bath	-	+56	-7	+63

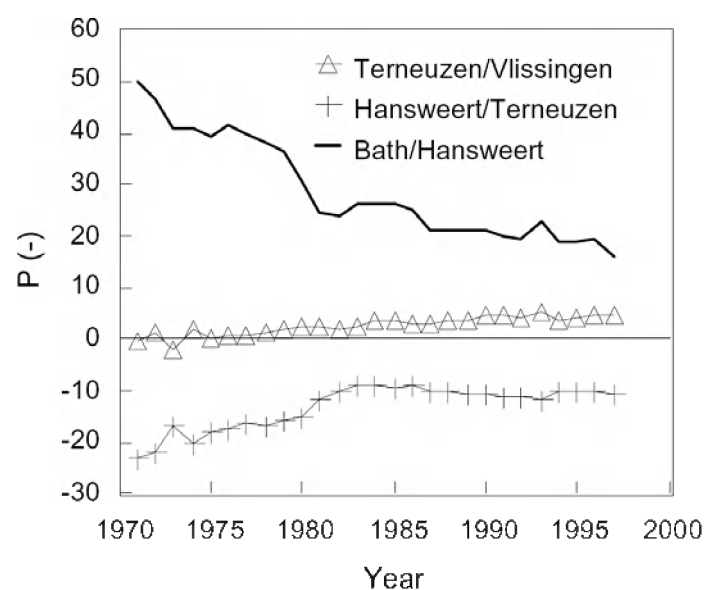
Tabel 2.7: Veranderingen van de gemiddelde waterstand, hoog- en laagwater en getijslag (cm/eeuw) in de Westerschelde (Vroon, 1997).

2. Getij-asymmetrie

Een maat voor de getij-asymmetrie is de verhouding tussen de vloed- en ebduur. In het Schelde-estuarium duurt de vloed korter dan de eb, waardoor sprake is van vloeddominantie. In Bath en Antwerpen is de verhouding tussen de vloedduur en ebduur enigszins kleiner ($\sim 0,88$) dan in Vlissingen en Hansweert ($\sim 0,93$) (Vroon, 1997). Er is dus sprake van een toename van de vloeddominantie in oostwaartse richting.

Tussen het begin van de 20^e eeuw en 1985 is de verhouding nauwelijks veranderd, zie ook Dronkers (2005). Aubrey en Speer (1985), zie ook Wang et al. (1999) en Wang et al. (2002), analyseren de getij-asymmetrie in termen van het faseverschil $2\varphi_2 - \varphi_4$, waarbij φ_2 en φ_4 respectievelijk de fasen zijn van de dubbeldaagse en viermaaldaagse component van het verticale getij (respectievelijk M2 en M4). Indien dit faseverschil in het interval $(0, 180^\circ)$ ligt, is sprake van vloeddominantie, anders van ebdominantie, zie eveneens hoofdstuk 3. Voor de periode 1955-1982 neemt de ebdominantie tussen Terneuzen en Hansweert af; na 1982 verandert de (geringe) ebdominantie niet. Tussen Hansweert en Bath neemt de vloeddominantie gedurende de periode 1971-1987 af, gevolgd door een periode, waarbij de vloeddominantie weinig verandert. Dit wordt weergegeven in figuur 2.12b, waarbij de parameter P gedefinieerd is als:

$$P = (2\varphi_2 - \varphi_4)_{station2} - (2\varphi_2 - \varphi_4)_{station1} \quad (2.1)$$



Figuur 2.12b: Verandering getij-asymmetrie in de Westerschelde (Wang et al, 2002).

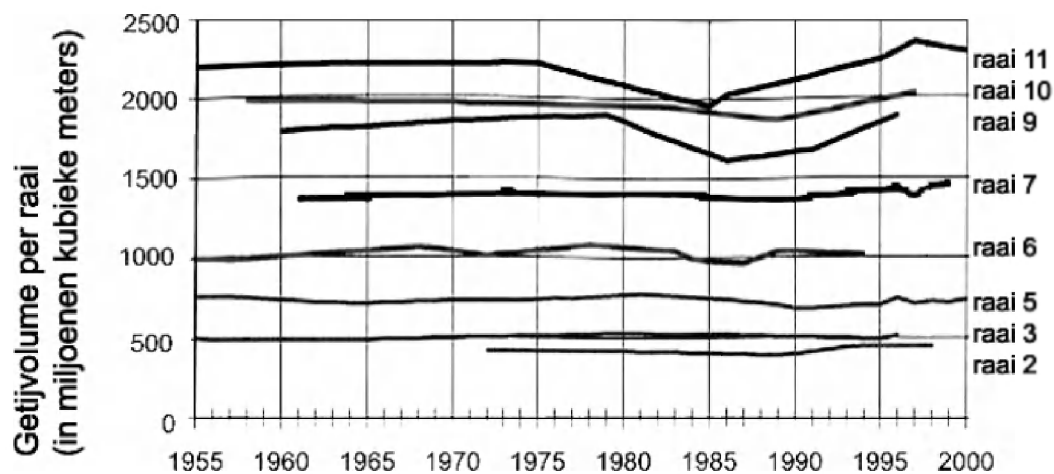
In Vlissingen en Terneuzen is de getij-asymmetrie nauwelijks veranderd. Als geheel is de asymmetrie van het getij in de Westerschelde dus afgenomen, wat een afname suggereert van de natuurlijke netto sedimenttransporten. Hoewel de resultaten van beide analysemethoden (op basis van de verhouding van vloed- en ebduur of op basis van het faseverschil) niet geheel overeenkomen, kan wel worden gesteld, dat de vloeddominantie in het oosten van de Westerschelde (Bath) groter is dan elders. De getij-asymmetrie in het westen (Vlissingen en Terneuzen) is de afgelopen decennia niet of nauwelijks veranderd.

3. Getijvolume

De kentering van het horizontale getij treedt 0,5-1 uur na hoog- en laagwater op (de Jong, 1989). Het getijvolume door de raaien 2 tot en met 11 (van oost naar west) is weergegeven in figuur 2.13. De getijvolumes zijn afgeleid van de reguliere debietmetingen, welke door Rijkswaterstaat sinds 1930 in een aantal vaste meetraaien worden uitgevoerd. Veranderingen tussen 1955 en 2000 zijn in het algemeen gering in het midden en oosten van de Westerschelde (raaien 2 tot en met 7); in het westelijk deel (raaien 9 en 11) is tussen 1975 en 1985 sprake van een afname (10-15 procent) gevolgd door een toename (20 procent).

Opmerkelijk is dat deze variatie in de tussengelegen raai 10 vrijwel ontbreekt. Volgens Vroon (1997) lijkt, op basis van waarnemingen tussen 1930 en 1995 het getijvolume in het westen van de Westerschelde enigszins af te nemen en in het meest oostelijke deel toe te nemen. Dit laatste gaat samen met de toename van de getijslag in het oostelijke deel. De op basis van tabel 2.3 geschatte toename van het getijvolume in de mond van de Westerschelde, ter grootte van 14 miljoen m³ (~ 1 procent) voor de periode 1960-1990, volgt niet uit figuur 2.13. Dit valt binnen de nauwkeurigheid van ± 5 procent, waarmee het getijvolume met debietmetingen kan worden bepaald (Holzhauer et al, 2006).

Opmerkelijk is dat het vloedvolume in de mond van de Westerschelde, zoals gereconstrueerd door Van der Spek (1994), de afgelopen eeuwen nauwelijks is veranderd (1650: 1,19 10⁹ m³, 1800: 1,10 10⁹ m³ en 1968: 1,14 10⁹ m³).



Figuur 2.13: Verandering van het getijvolume tussen 1955 en 2000 in een aantal dwarsraaien in de Westerschelde (Kramer, 2002).

2.9 Evolutie van het geulenstelsel

In Appendix A wordt een beschrijving gegeven van de ontwikkeling van het geulenstelsel in de Westerschelde sinds 1955. Hieruit komt het volgende beeld naar voren.

1. Ebgeulen

De ebgeulen in het oostelijk deel van de Westerschelde (macrocellen 5, 6 en 7) zijn in de periode 1955-2002 met gemiddeld drie meter verdiept van 10 à 11 meter tot 13 à 14 meter (beneden NAP-2 meter). In het middendeel (macrocel 4) is de ebgeul verondiept van gemiddeld 15 naar 11 meter. De ebgeulen in het westelijk deel zijn stabiel.

2. Vloedgeulen

De vloedgeulen in macrocellen 6 en 7 zijn tussen 1955 en 2002 met 1,5 à 3 meter verdiept tot een gemiddelde diepte van 6 à 7 meter, terwijl in macrocel 5 de vloedgeul met 7 meter stabiel is gebleven. In macrocel 4 is de vloedgeul verdiept met 4 meter tot gemiddeld 14 meter. De vloedgeul in macrocel 3 is met een diepte van 11 meter stabiel gebleven, terwijl deze in macrocel 1 ruim één meter is verdiept tot 13,5 meter. De vloedgeulen in het oostelijk deel (macrocellen 5, 6 en 7) zijn dus aanmerkelijk ondieper dan in de overige macrocellen.

3. Kanteling eb- en vloedgeulen

De kantelindex $K(t)$ betreft de verhouding tussen de diepte van de hoofdeb- en vloedgeul in een macrocel en is gedefinieerd als:

$$K(t) = \ln \left(\frac{h_{EG}(t)}{h_{VG}(t)} \right) \quad (2.2)$$

waarin $h_{EG}(t)$ en $h_{VG}(t)$ respectievelijk de diepte (meter beneden NAP-2 meter) van de hoofdeb- en hoofdvloedgeulen zijn. Een positieve waarde van $K(t)$ geeft aan, dat de diepte van de ebgeul groter is dan die van de vloedgeul. Indien $K(t)$ negatief is, geldt dat de vloedgeul dieper is dan de ebgeul. Vooral van belang is het verloop van $K(t)$, omdat hiermee morfologische veranderingen worden aangegeven. Indien $K(t)$ systematisch groter of kleiner wordt, is sprake van degeneratie van het tweegeulstelsel.

De kantelindex $K(t)$ is voor de macrocellen 1, 4 en 6 sinds 1955 afgenomen, respectievelijk door een verdieping van de vloedgeul, een verondieping van de ebgeul én een verdieping van de vloedgeul, en een verdieping van zowel de eb- als de vloedgeul. Voor macrocel 4 is $K(t)$ sinds 1980 negatief, dat wil zeggen de vloedgeul is dieper dan de ebgeul. De voortdurende afname van $K(t)$ in deze macrocel, welke sinds de tweede verruiming versneld optreedt, duidt op een mogelijke degeneratie van het tweegeulstelsel. In de macrocellen 3 en 7 is de kantelindex weinig veranderd. Voor macrocel 5 is, door verdieping van de ebgeul, $K(t)$ toegenomen. Geconcludeerd wordt dat de meeste macrocellen, ondanks variaties in de kantelindex de afgelopen 50 jaren, een stabiel gedrag vertonen. Slechts in macrocel 4 is sprake van een doorgaande kanteling in de richting van de vloedgeul, dat wil zeggen de vloedgeul verruimt en de ebgeul neemt in betekenis af.

4. Kortsluitgeulen

Drempelgebieden met dynamische kortsluitgeulen worden momenteel aangetroffen in de macrocellen 1, 3 en 5. In macrocel 4 zijn de kortsluitgeulen op het drempelgebied verdwenen, terwijl in macrocellen 6 en 7 het ontstaan en migreren van de geulen beperkt is door het onderhoudsbaggerwerk en door de aanwezigheid van de geleidingsdam.

5. Gedrag macrocellen

Macrocel 1 wordt gekenmerkt door een verruimende vloedgeul, welke rond 2000 een vrijwel gelijke diepte bereikt als de ebgeul. Stortingen na de tweede verruiming lijken de kanteling ten gevolge van de natuurlijk verdiepende vloedgeul tegen te gaan. Het drempelgebied vertoont een grote dynamiek door de migratie van een ebdominante kortsluitgeul.

Macrocel 3 is zowel voor de eb- als de vloedgeul stabiel; de kantelindex is gedurende de afgelopen 50 jaren weinig veranderd. Het drempelgebied is het meest dynamisch van alle macrocellen met snel migrerende, ebdominante kortsluitgeulen (tijdschaal: 12 jaren). In het drempelgebied komen ook kortsluitgeulen over de platen voor.

Macrocel 4 is de enige cel, waar de vloedgeul dieper is dan de ebgeul. Deze situatie is omstreeks 1980 ontstaan ten gevolge van natuurlijke processen, welke mogelijk verband houden met de bochtafsnijding van de hoofdebgeul bij Hansweert. De tweede verdieping heeft de kanteling verder versneld. Het drempelgebied is volledig geërodeerd en er zijn momenteel geen kortsluitgeulen meer.

De hoofdebgeul in macrocel 5 is vooral verdiept tijdens en na de eerste en tweede verdiepingen. De vloedgeul, bestaande uit twee afzonderlijke geulen, is stabiel gebleven, al vertoont de noordelijke vloedgeul tekenen van degeneratie. Macrocel 4 lijkt van invloed te zijn op de morfologische veranderingen van macrocel 5. Door de eerste verdieping zijn dynamische, kleine kortsluitgeulen verdwenen.

De hoofdeb- en hoofdvloedgeulen van macrocel 6 verruimen beide. Voor de vloedgeul is dit een natuurlijk proces, terwijl de verruiming van de ebgeul het gevolg is van het baggeren; zonder deze ingrepen zou in de ebgeul netto sedimentatie optreden. Baggeractiviteiten lijken het ontstaan van grote migrerende kortsluitgeulen in het weinig dynamische drempelgebied tegen te gaan.

Evenals in macrocel 6 verruimen in macrocel 7 zowel de hoofdeb- als de hoofdvloedgeulen. Voor de vloedgeul, waarin wordt gestort, is dit een natuurlijk proces (mogelijk ook beïnvloed door de geleidingsdam); de hoofdebgeul is vooral verruimd tijdens en na de eerste en tweede verdieping. De bewegingsvrijheid van de kortsluitgeulen, en daarmee de dynamiek van het drempelgebied, worden beperkt door de geleidingsdam.

6. Samenvatting

De morfologische veranderingen van de Westerschelde sinds 1955 worden als volgt gekenmerkt:

- Een verondieping van de ebgeul in macrocel 4. De ebgeulen in het oostelijke deel (macrocellen 5, 6 en 7) verdiepen; in het westelijke deel (macrocellen 1 en 3) zijn zij stabiel.
- Stabiele vloedgeulen in macrocellen 3 en 5 en verdiepingen van de vloedgeulen in de overige macrocellen.
- Alleen voor de macrocellen 3 en 7 is de kantelindex $K(t)$ weinig veranderd. Voor macrocel 4 vormt de afname van $K(t)$ mogelijk een aanwijzing voor de degeneratie van het tweegeulensysteem. De tweede verdieping heeft de kanteling in macrocel 4 weer versneld. Ook de verdiepingen van de ebgeulen in macrocellen 5, 6 en 7 tijdens en na de eerste en tweede verruiming hebben de kanteling beïnvloed.
- De belangrijkste, grootschalige verandering betreft de kanteling van de eb- en vloedgeul in macrocel 4; sinds omstreeks 1980 is de vloedgeul dieper dan de ebgeul. Dit natuurlijke proces is mogelijk beïnvloed door de bochtafsnijding van de ebgeul bij Hansweert.
- Andere natuurlijke veranderingen zijn de erosie van de vloedgeulen in macrocel 1, 6 en 7; stortingen in deze geulen compenseren niet de natuurlijke evolutie.
- De morfologische veranderingen van macrocel 5 lijken mede te worden bepaald door macrocel 4.
- De meest dynamische kortsluitgeulen op de drempelgebieden worden aangetroffen in de macrocellen 1, 3 en 5.
- De eerste verruiming is van invloed geweest op het verdwijnen van kortsluitgeulen in het drempelgebied van macrocel 5. In macrocellen 6 en 7 lijkt het baggeren het ontstaan en de dynamiek van grote migrerende kortsluitgeulen tegen te gaan.

In het algemeen kan dus worden gesteld dat de geulen van de Westerschelde gemiddeld verdiepen sinds 1955. Verruiming en baggeren lijken, ook na de verdiepingsperiode, van invloed op de geulontwikkeling en op het gedrag van de kortsluitgeulen.

2.10 Evolutie van arealen

Volgens Vroon (1997) zijn ondiepwatergebieden sterk achteruit gegaan; verlagen slikken en zijn slikken en schorren in het zoute deel van het estuarium in omvang afgenomen evenals slibrijke dynamische gebieden in het oostelijke deel van het estuarium. Algemeen is het beeld, dat door de tweede verdieping veel platen sterk omhoog kwamen, terwijl er op veel slikken juist sprake was van sterke erosie, waardoor de veenlagen bloot komen te liggen³. Het oppervlak, dat de geulen innemen, is na de eerste verdieping toegenomen ten koste van het ondiepwatergebied. De optredende verstelling is verder versterkt door een toename van de sedimentatie op de platen.

De bepaling van de veranderingen in het areaal ondiepwatergebied en het areaal intergetijdengebied is gebaseerd op de definities en gegevens zoals gebruikt tijdens de evaluaties van MOVE (2003, 2006):

- Het areaal ondiepwatergebied wordt begrensd door de dieptelijnen NAP-2 meter en NAP-5 meter en maakt deel uit van het subgetijdengebied van de geulen.
- Het areaal intergetijdengebied is het zandoppervlak boven NAP-2 meter (en onder NAP+3,5 meter).

De arealen zijn dus, in navolging van eerdere morfologische studies, bepaald ten opzichte van vaste horizontale referentieniveaus. Het belangrijkste verschil met eerdere studies is dat voor deze systeembeschrijving de areaalveranderingen zijn bepaald op de ruimteschaal van de macrocellen. Hierdoor is het mogelijk om de veranderingen meer expliciet (maar voorsnog wel kwalitatief) te koppelen aan het gedrag van de geulen van meergeulensysteem. Daarnaast is de analyse ook gericht op het vaststellen waarin een bepaald type gebied is veranderd.

De resultaten van de areaalbepaling zijn weergegeven in de figuren 2.14a en 2.14b. Hieruit komt het volgende ontwikkelingsbeeld naar voren:

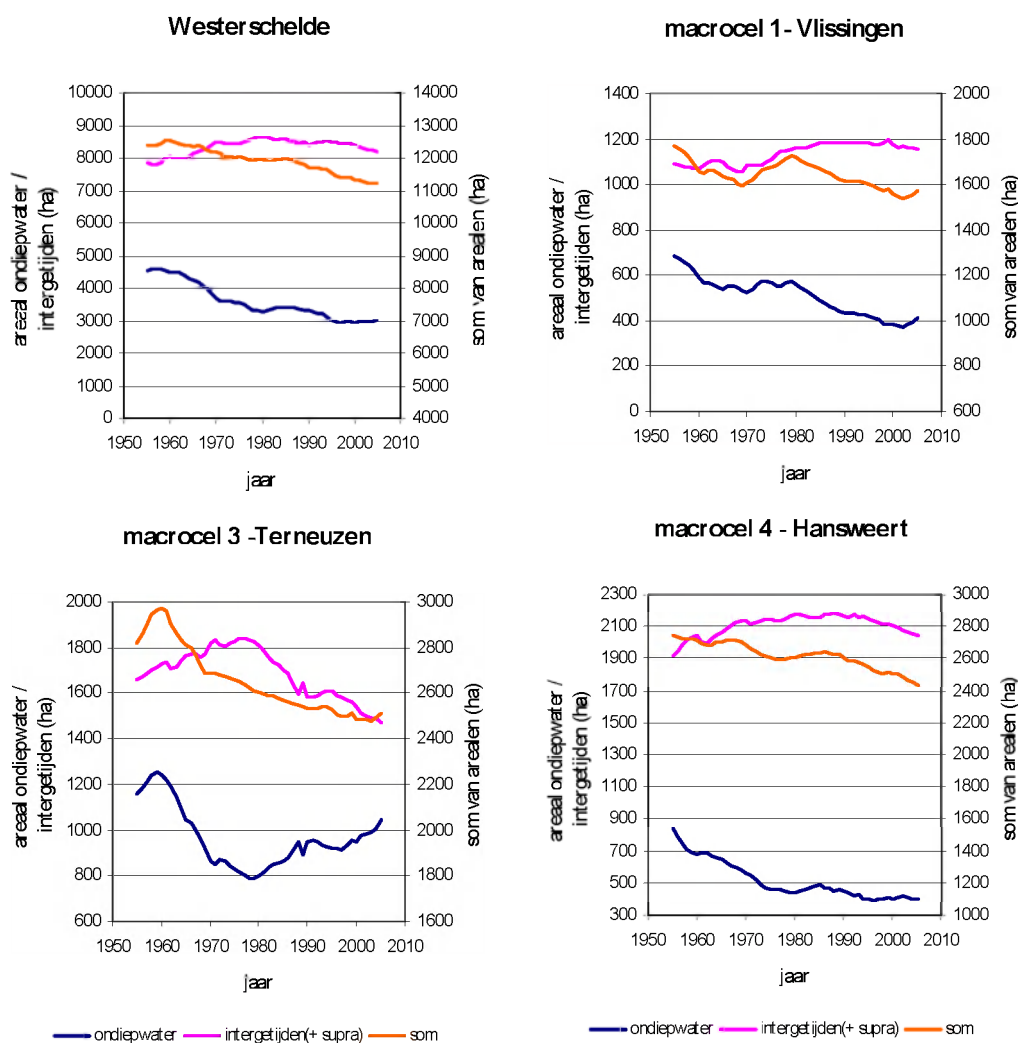
In de Westerschelde als geheel neemt het areaal ondiepwatergebied af; vooral tussen 1960 en 1980. Een deel van het ondiepwatergebied is hierbij omgezet in intergetijdengebied. Het resterende deel van de afname (ongeveer de helft) wordt veroorzaakt door erosie van de diepere geuldelen. Sinds 1980 neemt het ondiepwatergebied nog slechts weinig af door voortgaande erosie van de diepere geuldelen. Het areaal intergetijdengebied neemt sinds 1980 echter ook af. Het gevolg van deze ontwikkelingen op megaschaal is, dat het oppervlak van het voor de ecologie potentieel interessante gebied boven NAP-5 meter sinds tenminste 1955 afneemt (10 procent gedurende 50 jaar). De afname van het areaal ondiepwatergebied is relatief groot (35 procent in 50 jaar).

Deze afname van het areaal boven NAP-5 meter treedt in alle macrocellen op. Het moment waarop deze afname begint varieert tussen tenminste sinds 1955 (4,6) en 1970 (5). Alleen in het gebied van de Hoge Platen en de Platen van Ossensisse (dit zijn geen macrocellen) treedt geen duidelijke afname van areaal boven NAP-5 meter op.

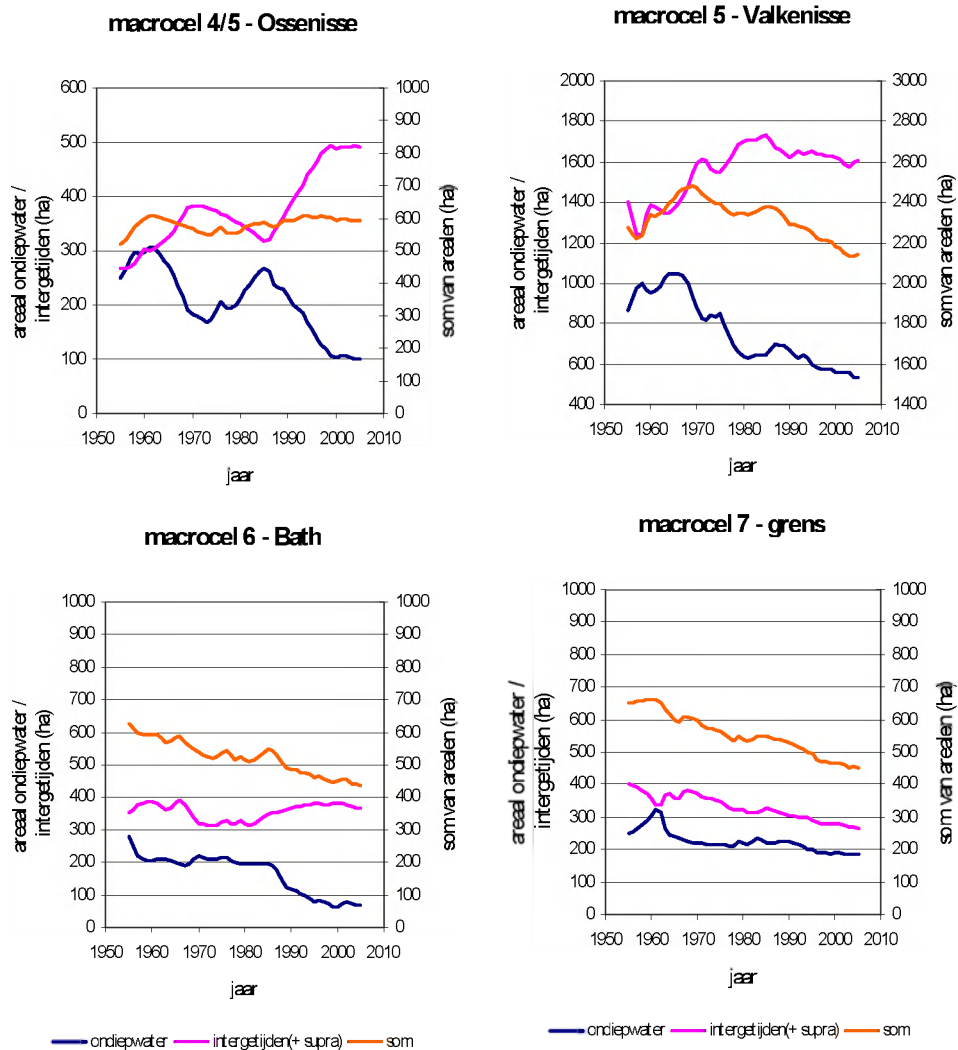
Het fenomeen waarbij ondiepwatergebied wordt omgezet in intergetijdengebied doet zich vooral voor in de macrocellen van Terneuzen (3), Hansweert (4), Valkenisse (5) en het overgangsgedebied tussen Hansweert en Valkenisse (Plaatgebied van Ossensisse (4/5)). Dit zijn de macrocellen waar de intergetijdengebieden doorsneden worden (3,5) / werden (4,4/5) door migrerende kortsluitgeulen.

³ Aanvulling vanuit de Werkgroep Morfologie en Ecologie.

Alleen in de macrocel bij Terneuzen (3) en tot voor kort in het Ossenisgegebied (4/5) treedt ook het omgekeerde proces op waarbij het opgebouwde areaal intergetijdengebied naar verloop van tijd ook weer (tijdelijk) afneemt en wordt omgezet in ondiepwatergebied. In het gebied nabij Terneuzen is deze 'regeneratie van ondiepwatergebied' te relateren aan de migratie van de kortsluitgeulen in het drempelgebied van de vloedgeul Everingen sinds 1975 en de daarop volgende twee veranderingen in de patronen van kortsluitgeulen tussen 1986 en 2005.



Figuur 2.14a: Areaalveranderingen van ondiepwater- en intergetijdengebieden van de Westerschelde en de macrocellen 1, 3 en 4.

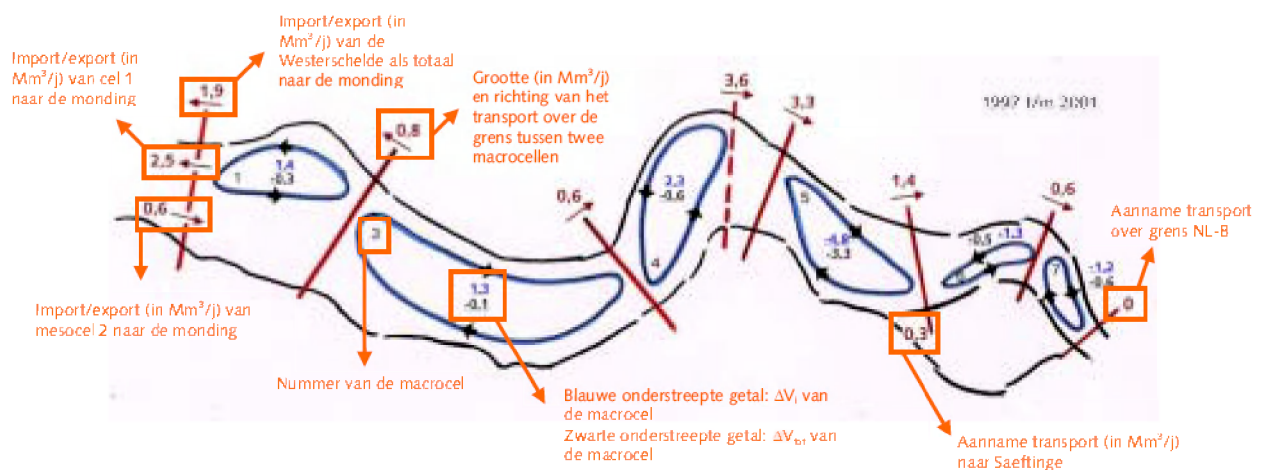


Figuur 2.14b: Areaalveranderingen van ondiepwater- en intergetijdengebieden van het Ossensissegebied (overgangsgebied macrocellen 4/5) en de macrocellen 5, 6 en 7.

2.11 Zandbalans

1. Westerschelde

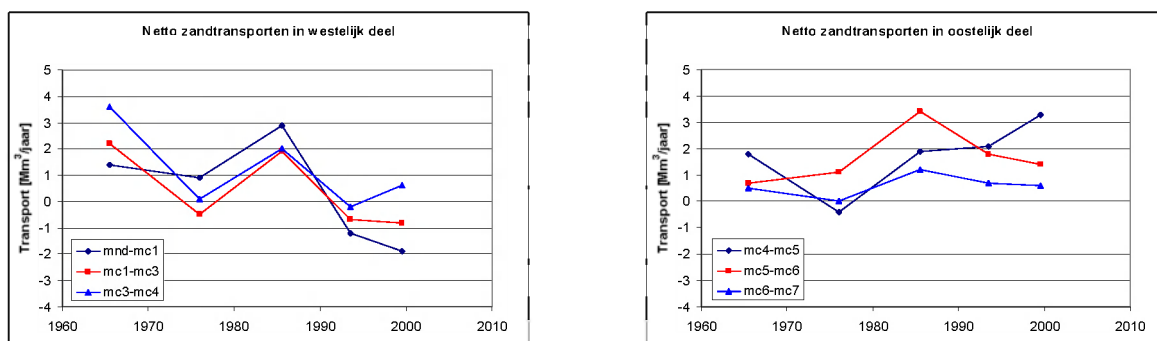
In Nederbragt en Liek (2004) worden zandbalansen voor de Westerschelde afgeleid voor opvolgende perioden sinds 1960⁴. Figuur 2.15 toont de zandbalans voor de periode 1997 tot en met 2001. De zeewaartse begrenzing wordt gevormd door de westelijke rand van macrocel 1, welke ongeveer samenvalt met de raai Vlissingen-Breskens. Bij de balansen wordt verondersteld, dat er geen netto zandtransport over de Belgisch-Nederlandse grens optreedt. Verder wordt een netto transport van 0,3 miljoen m³/jaar naar Saeftinge aangenomen en een netto transport ter grootte van 0,6 miljoen m³/jaar van de monding naar mesocel 2 (ten zuiden van de Hooge Platen).



Figuur 2.15: Zandbalans voor de Westerschelde voor de periode 1997 tot en met 2001 (Nederbragt en Liek, 2004).

Het verloop van de netto zandtransporten tussen de opvolgende macrocellen (mc1-mc3, mc3-mc4, enzovoort) en tussen macrocel 1 en de monding (mnd-mc1) is weergegeven in figuur 2.16. De transporten zijn afgeleid voor de balansperioden 1960 tot en met 1970, 1971 tot en met 1980, 1981 tot en met 1989, 1990 tot en met 1996 en 1997 tot en met 2001 en de netto transporten zijn weergegeven als functie van het midden van deze tijdvakken.

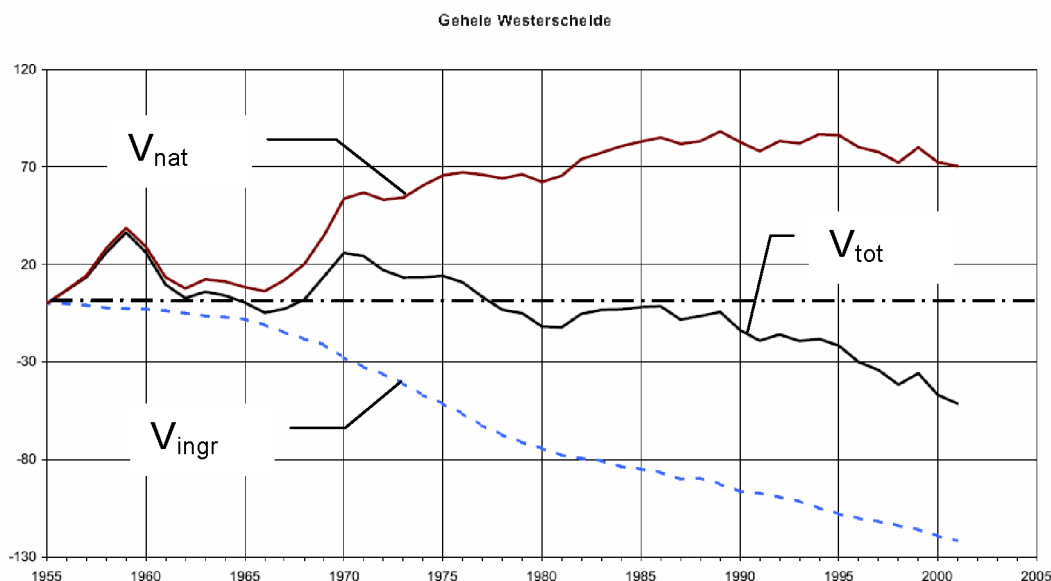
⁴ Bij de opgestelde balansen wordt verondersteld, dat het sediment bestaat uit alleen zand. Voor de Westerschelde zal deze aanname wel terecht zijn; voor de Beneden-Zeeschelde zal het aandeel van slib (procent < 63 μ m) wat groter kunnen zijn. Informatie over de samenstelling van het sediment is pas na 2003 volledig (HAECON, 2006).



Figuur 2.16: Netto zandtransporten tussen de macrocellen. Positieve transporten zijn oostwaarts, negatieve transporten westwaarts. Data volgens Nederbragt en Liek (2004).

In het westelijk deel zijn de jaarlijkse netto transporten sinds 1960, maar vooral na 1985, afgenomen met ongeveer 3 miljoen m^3 /jaar (minder oostwaarts / meer westwaarts). In het oostelijke deel is het verloop minder uitgesproken, maar lijkt er sprake te zijn van een geringe toename (meer oostwaarts transport). Vanuit macrocel 4 is er dus een toenemend oostwaarts en westwaarts netto transport. Mogelijk houdt dit verband met de bochtafsnijding bij Hansweert, waardoor het drempelgebied volledig is geërodeerd (zie paragraaf 2.9). Het “natuurlijke” volume van macrocel 4, dat is het volume gecorrigeerd voor ingrepen, is tussen 1985 en 2000 met ongeveer 40 miljoen m^3 afgenomen (figuur 3.1 in Nederbragt en Liek, 2004). Indien dit zandvolume niet elders in de Westerschelde is gesedimenteerd, zal dit hebben geleid tot een afname van de jaarlijkse import ter grootte van 2-3 miljoen m^3 /jaar.

In figuur 2.17 is totale zandvolume (V_{tot}), het volume ten gevolge de ingrepen (V_{ingr}) en het hieruit afgeleide “natuurlijke” volume (V_{nat}) voor de gehele Westerschelde weergegeven. Het natuurlijke volume representeert het zandvolume, dat door het water is getransporteerd. Het volume ten gevolge van de ingrepen is kunstmatig, door de mens, verplaatst.



Figuur 2.17: Cumulatief zandvolume vanaf 1955 in de Westerschelde (Nederbragt en Liek, 2004). V_{tot} is het totale volume, V_{nat} is het “natuurlijke” volume en V_{ingr} is het volume ten gevolge van ingrepen.

Figuur 2.17 toont, dat het totale zandvolume van de Westerschelde ten opzichte van 1955 is afgenomen met 50 miljoen m^3 , ondanks de natuurlijke import. Het estuarium is dus gemiddeld over het gehele oppervlak van 300 kilometer² orde 15 centimeter dieper geworden. Sinds 1989 is het zandvolume in de Westerschelde dan ook kleiner geworden dan in de jaren ervoor (1955-1989), zodat kan worden gesproken van een verruiming van het estuarium. De zandafname wordt veroorzaakt door de netto onttrekking van zand ter grootte van 120 miljoen m^3 ten gevolge van de ingrepen (vooral zandwinning), welke slechts ten dele is gecompenseerd door de natuurlijke import van 70 miljoen m^3 sinds 1955. De gemiddelde “natuurlijke” import gedurende de volledige periode 1955 tot en met 2001 bedraagt 1,5 miljoen m^3 /jaar. Voor de periode 1970 tot en met 1988, dat wil zeggen na de periode met grote fluctuaties in het zandvolume⁵, is de gemiddelde import 1,8 miljoen m^3 /jaar. Sinds 1989 is sprake van een export van zand van gemiddeld 1,5 miljoen m^3 /jaar. Bij deze beschouwing kan de import en export zijn opgetreden ter plaatse van de Belgisch-Nederlandse grens, in de monding van de Westerschelde en van/naar het land van Saeftinge (voor dit laatste wordt 0,3 miljoen m^3 /jaar aangehouden).

Opgemerkt wordt dat de omslag van import naar export lijkt te zijn opgetreden vóór de wijziging in de bagger- en stortstrategie, waarbij sinds de tweede verruiming meer in het midden en westen van de Westerschelde wordt gestort. Wel concentreert de zandwinning zich sinds 1991 meer in het oosten van de Westerschelde; in hoeverre dit van invloed is op de netto zanduitwisseling in de mond is niet duidelijk.

⁵ Het is niet duidelijk, waardoor de grote fluctuaties in het totale zandvolume zijn veroorzaakt in de periode 1955-1970. De netto import en export bedraagt 6-12 miljoen m^3 /jaar gedurende perioden van ongeveer vijf jaar.

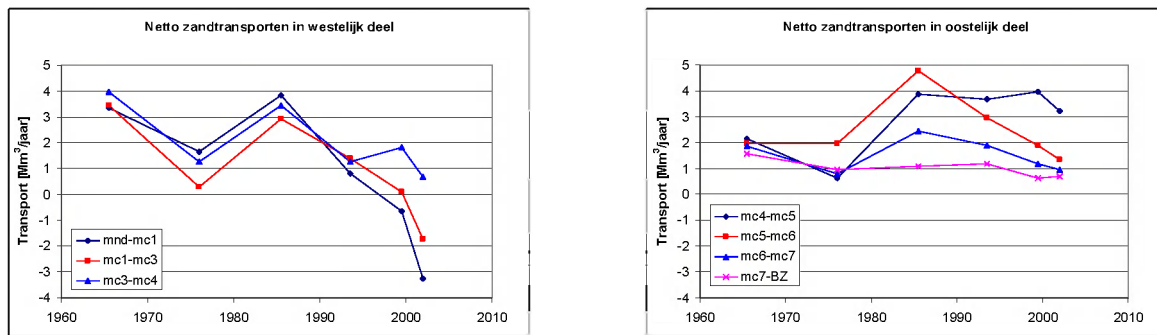
2. Westerschelde en Beneden-Zeeschelde

Recent is door HAECON de zandbalans voor de Westerschelde geactualiseerd (HAECON, 2006). Bij de zandbalans is tevens de Beneden-Zeeschelde betrokken, waardoor ter plaatse van de Belgisch-Nederlandse grens het netto zandtransport kan worden bepaald. Hierbij is verondersteld dat ter plaatse van de bovenstroomse rand van het balansgebied (Rupelmonde) geen netto transport optreedt. De resultaten van deze studie waren ten tijde van het schrijven van de systeembeschrijving nog niet definitief en worden dus onder voorbehoud gepresenteerd. Voorlopige resultaten lijken aan te geven, dat ter plaatse van de Belgisch-Nederlandse grens én Saeftinge voor de periode 1955-2004 gemiddeld een netto zandtransport vanuit de Westerschelde is opgetreden van 1,5 miljoen m³/jaar. Verondersteld wordt dat 0,3 miljoen m³/jaar wordt getransporteerd naar Saeftinge, zodat de export vanuit de Westerschelde ter plaatse van de grens 1,2 miljoen m³/jaar bedraagt. Het netto transport ter plaatse van de grens lijkt sinds 1955, behalve tijdens de eerste verdieping, redelijk constant te zijn geweest. Echter, het aantal gebruikte bodems voor de zandbalans voor de Beneden-Zeeschelde is beperkt geweest (1930, 1950, 1960, 1970, 1980, 1990/91 en 2002/03). Omdat ter plaatse van de grens wel een export van zand optreedt, zal in de mond van de Westerschelde de import groter of de export kleiner zijn ten opzichte van de situatie dat geen netto uitwisseling ter plaatse van de bovenstroomse rand wordt aangenomen (zoals bij de zandbalansen volgens RIKZ). De geactualiseerde zandbalans geeft aan dat gedurende de meest recente jaren (1999 tot en met 2004) de export vanuit de Westerschelde naar de monding verder is toegenomen tot 3,2 miljoen m³/jaar (de totale export naar monding én Beneden-Zeeschelde bedraagt zelfs 3,9 miljoen m³/jaar). Tabel 2.8 geeft de netto transporten over de begrenzingen van de Westerschelde voor de verschillende balansperioden.

Periode	Mond Westerschelde	Belgisch-Nederlandse grens	Saeftinge	Totaal
1955 tot en met 2004	+2,1	-1,1	-0,3	+0,7
1960 tot en met 1970	+3,4	-1,6	-0,3	+1,5
1971 tot en met 1980	+1,7	-1,0	-0,3	+0,4
1981 tot en met 1989	+3,8	-1,1	-0,3	+2,4
1990 tot en met 1996	+0,8	-1,2	-0,3	-0,7
1997 tot en met 2001	-0,6	-0,6	-0,3	-1,5
1999 tot en met 2004	-3,2	-0,7	-0,3	-4,2

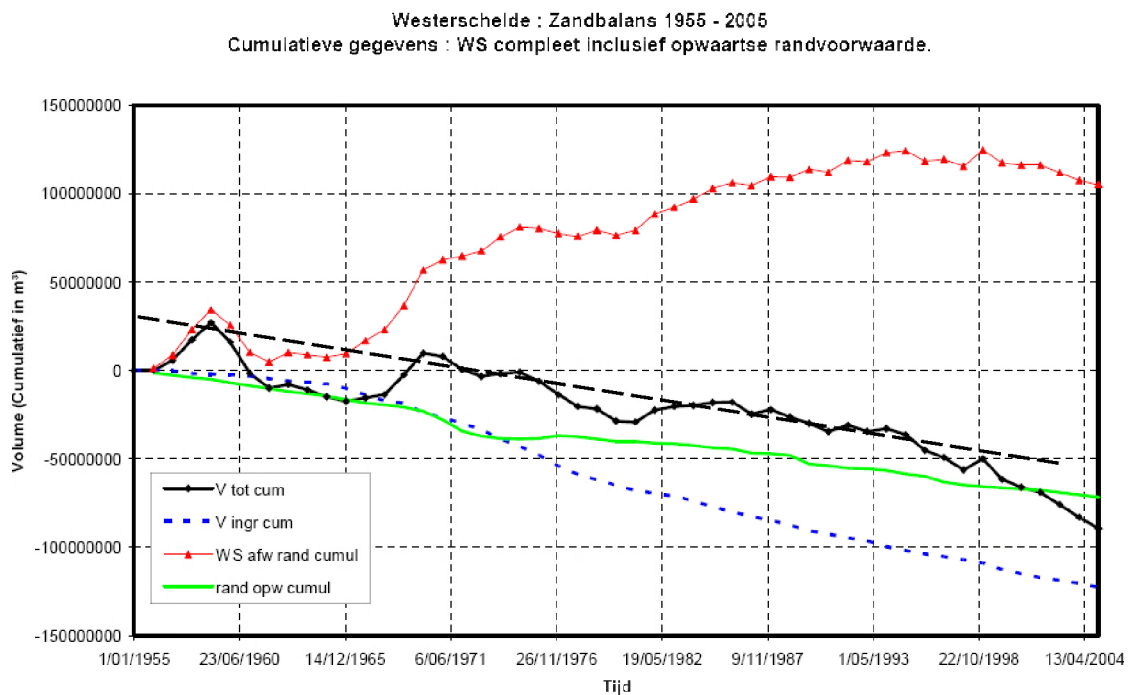
Tabel 2.8: Netto zandtransporten (miljoen m³/jaar) over de begrenzingen van de Westerschelde. Positief: import; negatief: export.

De netto transporten tussen de macrocellen zijn in figuur 2.18 weergegeven als functie van het midden van de balansperioden. In het westelijke deel van de Westerschelde lijkt de trend van een afname van het oostwaarts gerichte transport en een toename van het zeewaarts gerichte transport door te zetten. In het oostelijke deel is een systematisch verloop (nog) niet vast te stellen gegeven de variatie van de data.



Figuur 2.18: Netto zandtransporten tussen de macrocellen. Positieve transporten zijn oostwaarts, negatieve transporten westwaarts. Data volgens HAECON (2006).

Figuur 2.19 geeft het cumulatieve verloop van het totale zandvolume ($V_{tot\ cum}$), het volume ten gevolge van de ingrepen ($V_{ingr\ cum}$) en de volumes zoals getransporteerd over de grenzen van de Westerschelde ($WS\ afw\ rand\ cumul$ en $rand\ opw\ cumul$).

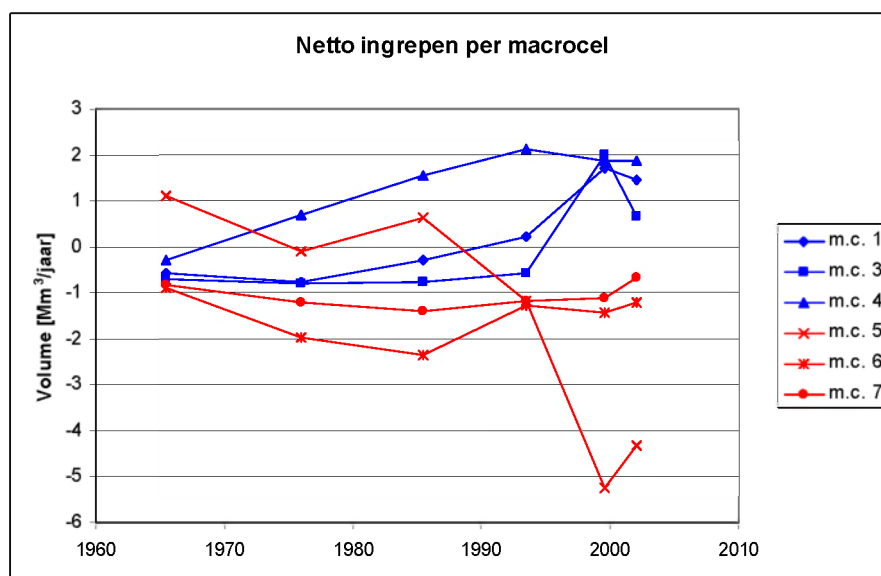


Figuur 2.19: Cumulatief zandvolume vanaf 1955 in de Westerschelde (HAECON, 2006). $V_{tot\ cum}$ is het totale volume, $V_{ingr\ cum}$ is het volume ten gevolge van ingrepen, $WS\ afw\ rand\ cumul$ is het volume door de mond van de Westerschelde en $rand\ opw\ cumul$ het volume naar het land van Saeftinge en de Beneden-Zeeschelde.

Uit de figuur volgt dat vanaf ongeveer 1975 het totale zandvolume ($V_{tot\ cum}$) van de Westerschelde kleiner is geworden dan het beginvolume in 1955. Echter, gegeven de variatie van de data kan ook worden gesteld dat de verruiming van de Westerschelde al sinds 1955 optreedt (en wellicht eerder).

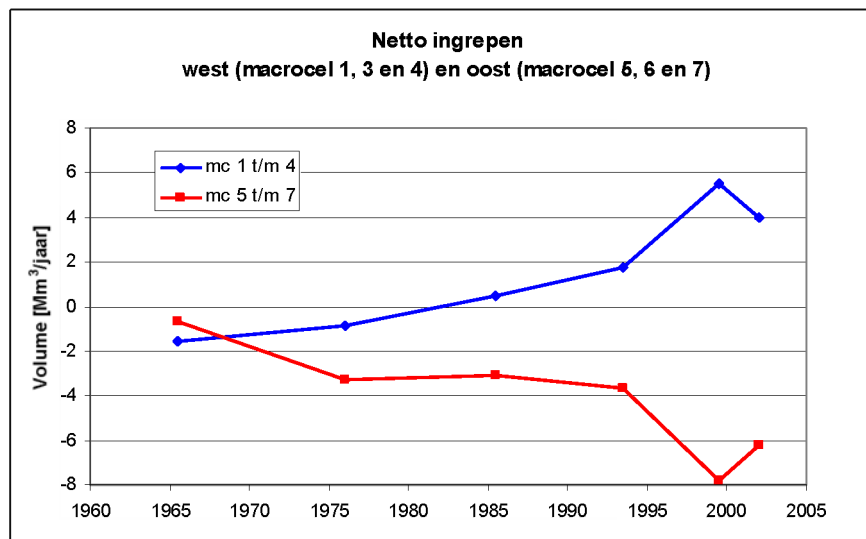
Dit veronderstelde lineaire verloop is eveneens weergegeven in figuur 2.19 (onderbroken lijn) en bedraagt voor de periode 1955 tot en met 2004 85 miljoen m³, wat overeenkomt met een gemiddelde diepteverandering van ongeveer 30 centimeter voor de gehele Westerschelde. Het cumulatieve zandvolume, dat over de zeewaartse rand van de Westerschelde is getransporteerd (*WS afw rand cumul*), neemt af sinds 1995-1998. Dit betekent, dat het estuarium ter plaatse van deze rand exporterend is geworden.

In figuur 2.20 is per macrocel het verloop van de netto ingrepen weergegeven.



Figuur 2.20a: Volume van de netto ingrepen per macrocel (miljoen m³/jaar). Data ontleend aan HAECON (2006).

In figuur 2.20b zijn de netto ingrepen voor het westelijke deel (macrocellen 1, 3 en 4) en het oostelijke deel samengevoegd.

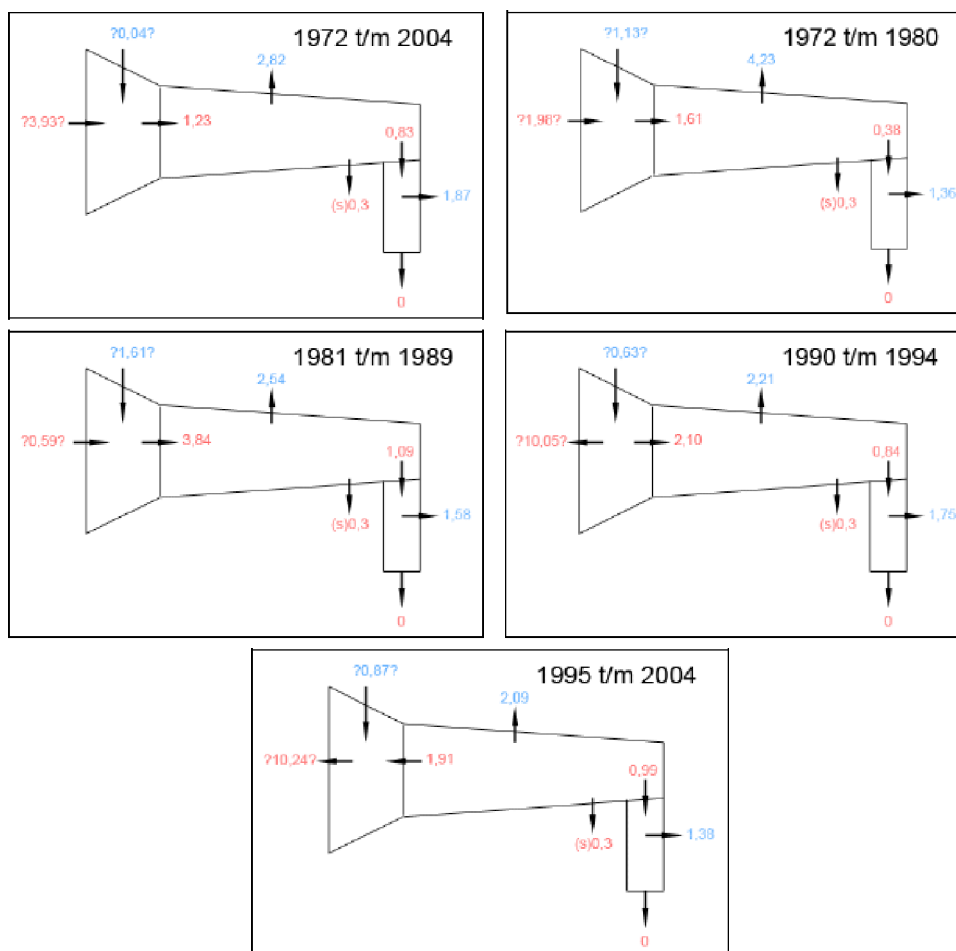


Figuur 2.20b: Volume van de netto ingrepen voor het westelijke deel (macrocellen 1 tot en met 4) en het oostelijke deel (macrocellen 5 tot en met 7) (miljoen m³/jaar). Data ontleend aan HAECON (2006).

Hieruit komt naar voren, dat vóór de eerste verdieping de netto ingrepen in het westelijke en oostelijke deel vrijwel gelijk zijn: in het westelijke deel wordt ongeveer 1 miljoen m³/jaar meer zand onttrokken dan in het oostelijke deel. In de opvolgende jaren treedt er geleidelijk een verschuiving op, waarbij vanaf ongeveer 1985 in het westen netto wordt gestort en in het oosten netto wordt gebaggerd. In 2000 is dit verschil tussen de netto ingrepen in het westen en het oosten opgelopen tot bijna 14 miljoen m³/jaar. Dit op kunstmatige wijze naar het westen brengen van zand kan de export van zand naar de monding hebben bevorderd.

3. Monding

Door HAECON (2006) is tevens de zandbalans voor het mondingsgebied geactualiseerd. De balansen voor opvolgende perioden vanaf 1972 kennen grotere onzekerheden dan voor de balansen van de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde. Dit wordt veroorzaakt door grotere onnauwkeurigheden in de lodingen en onzekerheden met betrekking tot de zandfractie. De afgeleide netto transporten tussen de monding en de zee kunnen daarom alleen in kwalitatieve zin worden geïnterpreteerd. Uit figuur 2.21 volgt, dat vóór 1990 het mondingsgebied nog importerend was. Na 1990 lijkt een sterke omslag te hebben gevonden van importerend naar exporterend. Niet duidelijk is, in hoeverre dit van invloed is op het exportgedrag van de Westerschelde. Opvallend is, dat de omslag van import naar export op de overgang mondingsgebied-zee lijkt te zijn voorafgegaan aan de verandering van import naar export ter plaatse van de overgang Westerschelde-mondingsgebied.



Figuur 2.21: Schematische weergave zandbalans voor de monding, Westerschelde en Beneden-Zeeschelde (HAECON, 2006).

3 Fenomenologische beschrijving van het natuurlijk morfologisch systeem

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het natuurlijk morfologisch systeem. Daartoe wordt het systeem beschouwd op verschillende ruimteschalen. Hierbij zal gebruik gemaakt worden van zowel fysische principes als empirische bevindingen gebaseerd op waarnemingen. De morfologie zal worden beschreven aan de hand van een aantal onderzoeksparameters: (i) de zandbalans van de Westerschelde (op megaschaal), (ii) de kantelindex als indicator voor het gedrag van het meergeulensysteem en (iii) de stortcapaciteit met betrekking tot de maximale hoeveelheid te storten sediment in de hoofdgeulen (beiden op macroschaal) en (iv) de verhangindicator als beschrijvende parameter voor de aanwezigheid van kortsluitgeulen (op mesoschaal).

3.1 Ruimte- en tijdschalen

De morfologische veranderingen hebben betrekking op een breed spectrum aan tijdschalen en ruimteschalen. Gezamenlijk bepalen zij het gedrag van het morfologische systeem. Wanneer het systeem wordt onderverdeeld in vier schaalniveaus, de mega-, macro-, meso- en micro-schaal, kan elk schaalniveau als een dynamisch subsysteem worden beschouwd. Op elke schaal kan in principe externe forcering worden uitgeoefend en op elke schaal kan in dat geval een respons van de forcering worden verwacht. Voor de vier te onderscheiden schalen is dit onderstaand samengevat.

Mega-schaal dynamiek. Veranderingen op de schaal van het hele estuarium of van de grootste compartimenten van het estuarium. De bijbehorende tijdschalen zijn eeuwen. De relevante natuurlijke ontwikkelingen en menselijke ingrepen (forcering) zijn zeespiegelrijzing, doorgaande zandwinning en inpolderingen.

Macro-schaal dynamiek. Veranderingen op het niveau van hoofd- en nevengeulen, zoals functiewisseling van de geulen. De bijbehorende tijdschalen zijn decennia. De relevante externe forcering bestaat uit verdiepingen, onderhoudsbaggerwerk, storten van baggerspecie, de 18,6 jarig cyclus van getij en dergelijke.

Meso-schaal dynamiek. Veranderingen zoals het ontstaan, migreren en verdwijnen van kortsluitgeulen, sedimenttransport over de platen, plaat-geul uitwisseling van sediment. De bijbehorende tijdschalen zijn jaren. Relevante externe forcering bestaat uit extreme condities, getijbeweging, baggeren, storten en zandwinning.

Micro-schaal dynamiek. Veranderingen op het niveau van beddingvormen, zoals megaribbels. Bijbehorende tijdschalen zijn dagen. Relevante externe forcering is alleen natuurlijk (getijbeweging).

Van een externe forcering op een bepaald schaalniveau wordt in eerste instantie een respons van het systeem op hetzelfde schaalniveau verwacht. Maar via de interne wisselwerkingen, de interacties tussen de verschillende schaalniveaus, kan er ook respons van het systeem op andere schaalniveaus ontstaan.

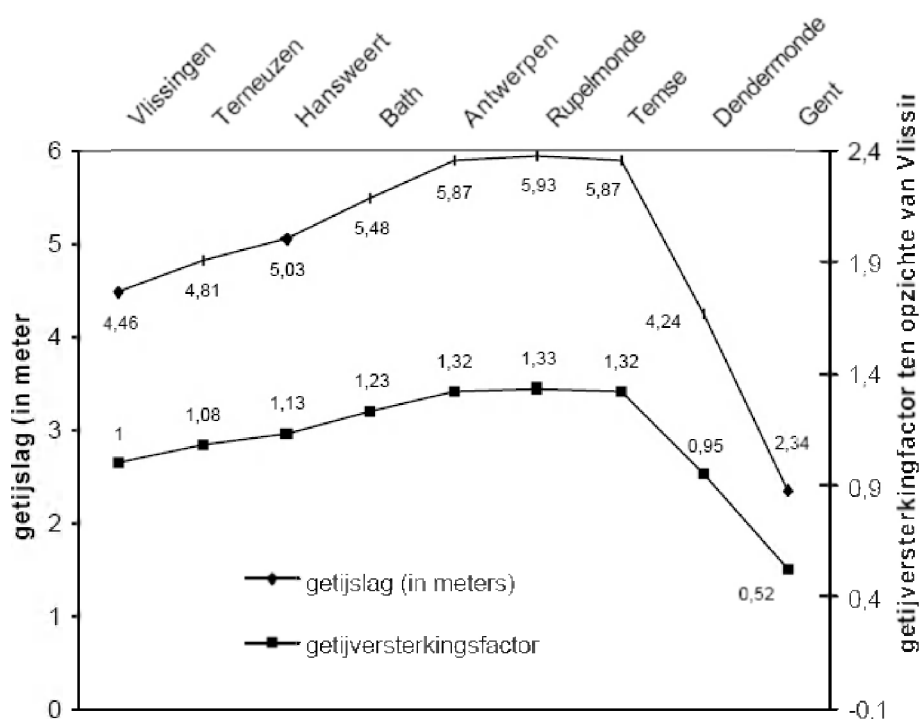
In de praktijk zal het niet eenvoudig zijn om op basis van alleen waarnemingen een relatie te leggen tussen een ingreep en de consequenties hiervan voor het systeem. Effecten van een ingreep dienen te worden geïsoleerd van zowel de natuurlijke variaties als de gevolgen van andere ingrepen.

Afhankelijk van de tijdschalen van de processen, welke mede bepaald worden door de ruimteschalen waarop de effecten worden beschouwd, dient een voldoende lange meetperiode beschikbaar te zijn, voorafgaand aan de ingreep, om uitspraken te kunnen doen over de significantie van de effecten.

3.2 Hydrodynamica

1. Getij en getijvoortplanting

Het getij in de Westerschelde is dubbeldaags met een gemiddelde getijslag van 4 meter in de mond (springtij 4,5 meter en doodtij 3 meter). Van de monding naar het oosten neemt de getijslag toe tot bijna 6 meter tijdens springtij nabij Antwerpen en vervolgens weer af tot ruim 2 meter bij Gent, zie figuur 3.1.

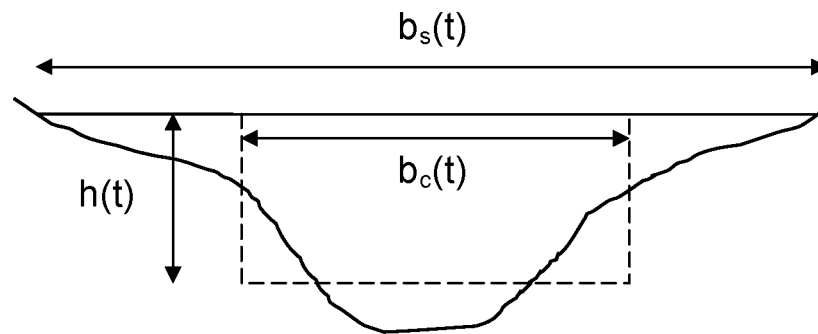


Figuur 3.1: Verloop van de getijslag in het Schelde-estuarium en de verhouding van de lokale getijslag ten opzichte van de getijslag in Vlissingen tijdens springtij (Kramer, 2002).

De toename van de getijslag wordt veroorzaakt door gedeeltelijke reflectie van de getijgolf bovenstrooms. In de Westerschelde is de voortplantingsnelheid van de getijgolf 11,7 m/s voor het hoogwater en 8,5 m/s voor het laagwater. Deze waarden komen overeen met voortplantingsnelheden voor wrijvingsgedomineerde getijstroming in een sterk convergerend getijdenbekken (bladzijde 252 in Dronkers, 2005). Voor de Beneden-Zeeschelde is de getijvoortplantingsnelheid geringer: 9,5 m/s voor hoogwater en 7,4 m/s voor laagwater.

2. Asymmetrie van het verticale getij

De voortplantingsnelheid c wordt bepaald door de vorm van het dwarsprofiel, in het bijzonder de diepte van de stroomvoerende geul h en de verhouding tussen de stroomvoerende breedte b_c en kombergende breedte b_s , zie navolgende schets.



Schematisatie profiel in stroomvoerend en kombergend deel.

Door de grotere waterdiepte loopt het hoogwater sneller dan het laagwater, mits de kombergende breedte bij hoogwater niet veel groter is dan die bij laagwater. Een grotere voortplantingsnelheid van het hoogwater dan van het laagwater leidt tot versterking van de vloeddominantie, omdat in het estuarium de tijdsduur tussen het laagwater en het daaropvolgende hoogwater kleiner wordt. De vloedperiode is korter dan de ebperiode, waardoor de stroomsnelheden tijdens vloed groter zullen zijn. Door de niet-lineaire relatie van de stroomsnelheid u met het sedimenttransport s , volgens $s \sim u^n$ met $n = 3$ à 5 , ontstaat een netto sedimenttransport in de richting van de vloedstroom.

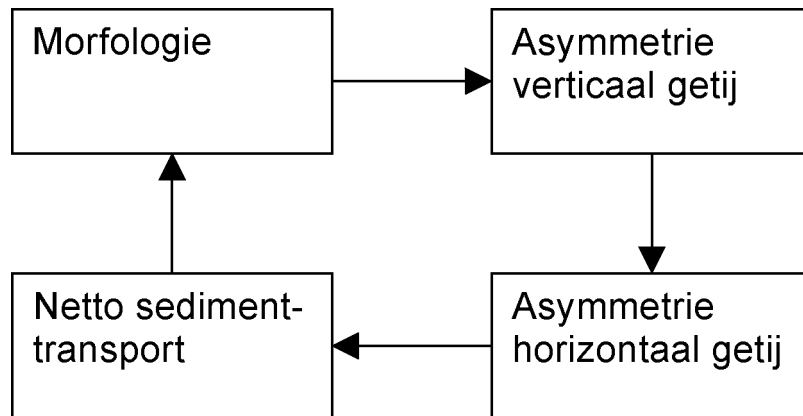
Voor getijdenbekkens met grote intergetijdengebieden, waardoor de kombergende breedte bij hoogwater veel groter is dan bij laagwater, kan de voortplantingsnelheid bij laagwater groter zijn dan bij hoogwater. De ebduur wordt dan korter dan de vloedduur resulterend in ebdominantie.

De getij-asymmetrie kan ook worden uitgedrukt in het faseverschil tussen het dubbeldaagse getij φ_2 en viermaaldaagse getij φ_4 . Indien het faseverschil $2\varphi_2 - \varphi_4$ een waarde tussen 0 en 180 graden heeft, is de vorm van de getijcurve dusdanig, dat de vloedduur korter is dan de ebduur resulterend in vloeddominantie (Aubrey en Speers, 1985). De grootte van de getij-asymmetrie wordt beschreven met de verhouding van de viermaaldaagse amplitude a_4 en van de dubbeldaagse amplitude a_2 .

Uit voorgaande blijkt, dat de getij-asymmetrie wordt bepaald door het verschil in voortplantingsnelheid tijdens hoog- en laagwater. De verhouding tussen de getijamplitude a en de gemiddelde waterdiepte h is hierbij van belang. Ook de verhouding tussen de geulbreedte en de kombergende breedte ofwel de aanwezigheid van intergetijdengebieden is hierop van invloed.

3. Invloed morfologie op asymmetrie van het verticale getij

Verondersteld wordt dat getij-asymmetrie van invloed is op de grootschalige morfologie van getijdenbekkens, omdat het bijdraagt aan het netto sedimenttransport en daarmee van invloed is op de zandbalans van het gebied. De getij-asymmetrie is afhankelijk van de getijvoortplanting, welke weer afhangt van de morfologie van het systeem. Er is dus een wederzijdse beïnvloeding van de getij-asymmetrie en de morfologie, zoals weergegeven in onderstaand diagram.

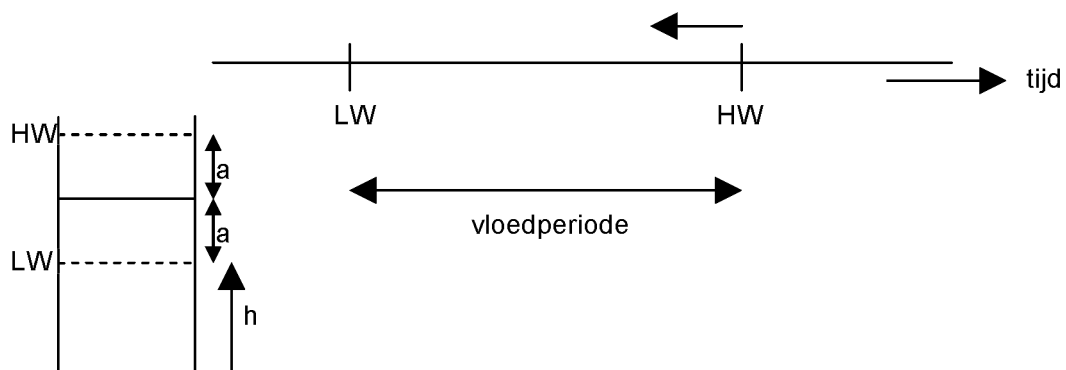


Schematische weergave van de interactie tussen morfologie en getij-asymmetrie.

De invloed van de morfologie op de getij-asymmetrie wordt voor twee gevallen geïllustreerd: een kleine/grote waterdiepte (ten opzichte van een gegeven getijamplitude) gecombineerd met een klein/groot oppervlak van het intergetijdengebied (ten opzichte van het totale oppervlak van het estuarium), zie tevens Dronkers (2005, bladzijde 324).

a. Oppervlak intergetijdengebied klein en waterdiepte klein ten opzichte van getijamplitude

Indien het oppervlak van het intergetijdengebied klein is ten opzichte van het oppervlak van het estuarium geldt dat de verhouding tussen de geulbreedte en de bergende breedte b_o/b_s bij hoogwater niet veel zal verschillen van de verhouding bij laagwater. Het verschil in de voortplantingsnelheid bij hoog- en laagwater wordt dus vooral bepaald door de verandering in de waterdiepte. Door de relatief grote voortplantingsnelheid bij hoogwater ten opzichte van laagwater is de vloedperiode korter dan de ebperiode. De stroomsnelheid tijdens vloed is dus groter dan tijdens eb en het estuarium is vloeddominant, zie onderstaande principeschets.

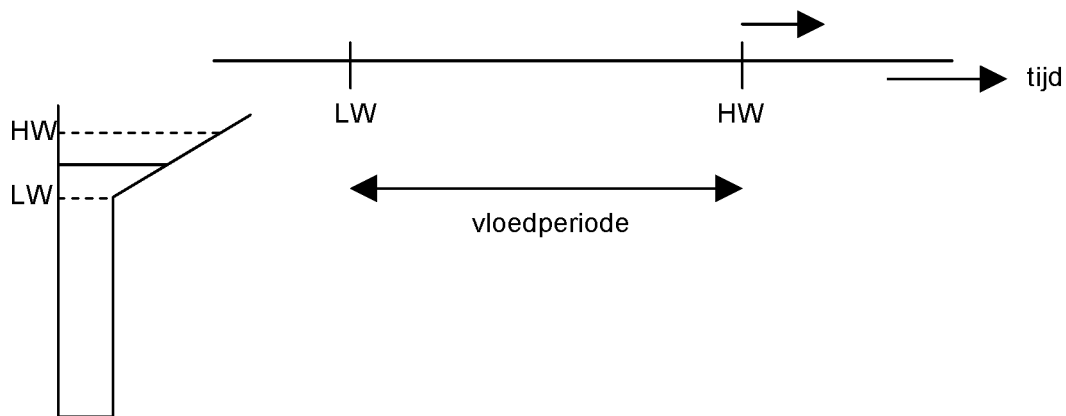


Vloeddominantie ten gevolge van getijvoortplanting in een ondiepe geul

Uit het voorgaande volgt, dat de vloeddominantie af zal nemen indien de geul verdiept.

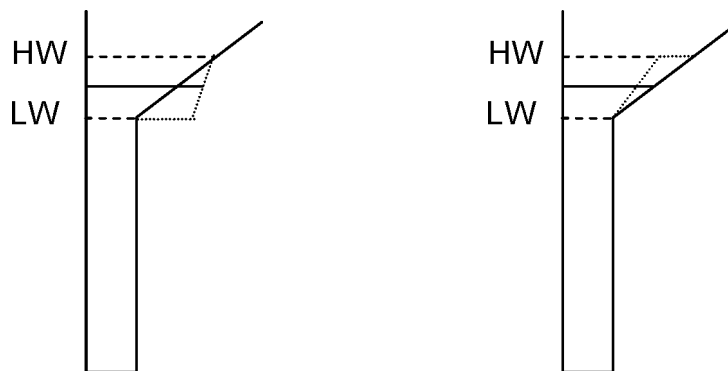
b. Oppervlak intergetijdengebied groot en waterdiepte groot ten opzichte van getijamplitude

Door de grote waterdiepte en de kleine getijamplitude zal de getijvoortplanting weinig worden beïnvloed door de variatie van de waterdiepte tijdens het getij. Tijdens hoogwater is de verhouding tussen de stroomvoerende breedte b_c en de kombergende breedte b_s klein ten opzichte van de waarde bij laagwater. De getijvoortplantingsnelheid tijdens hoogwater is dus kleiner dan tijdens laagwater, waardoor de ebperiode korter zal duren dan de vloedperiode. De stroomsnelheid tijdens eb is dus groter dan tijdens vloed en het estuarium is ebdominant, zie onderstaande principeschets.



Ebdominantie ten gevolge van aanwezigheid intergetijdengebied

Een afname van het areaal intergetijdengebied kan het gevolg zijn van erosie rond de laagwaterlijn en/of een ophoging van het intergetijdengebied ten gevolge van netto sedimentatie, zie hieronder. In beide gevallen neemt de waterberging op de intergetijdengebieden af, waardoor de vloeddominantie toeneemt.



Afname areaal intergetijdengebied door toename kombergende breedte tijdens laagwater (links) en afname kombergende breedte tijdens hoogwater (rechts).

In Wang et al. (2002) zijn voor het oosten, midden en westen van de Westerschelde, dat wil zeggen de gebieden tussen de vaste waterstandstations, de veranderingen van de morfologische parameters a/h en V_s/V_c gedurende de periode 1955-1996 vergeleken met de veranderingen van de parameter P , welke de getij-asymmetrie representeert. Hierbij is a de getijamplitude, h de waterdiepte, V_s het watervolume boven de intergetijdengebieden, V_c het geulvolume beneden de gemiddelde waterstand en zijn φ_2 en φ_4 de fasen van het dubbeldaagse en viermaaldaagse getij. Voor P is aangehouden het verschil tussen $2\varphi_2 - \varphi_4$ op de opwaartse en de afwaartse begrenzing van het (deel)gebied. Op deze wijze wordt het faseverschil op de opwaartse rand van de sectie beschouwd ten opzichte van het 'aangeboden' faseverschil op de afwaartse rand, zowel in 1955 als in 1996. De verandering van P gedurende deze tijdsperiode wordt vervolgens vergeleken met de verandering van de morfologische parameters. Wang, et al. vinden dat P toeneemt met a/h , dat wil zeggen indien de getijamplitude toeneemt of de waterdiepte afneemt is er sprake van een toename van de vloeddominantie. In het midden en westen zijn de veranderingen in beide parameters gering. In het oosten, tussen Hansweert en Bath, wordt P kleiner, wat betekent dat de vloeddominantie afneemt. De parameters a/h en V_s/V_c blijken aan elkaar sterk gerelateerd te zijn, waardoor de invloed van beiden moeilijk te scheiden is. Geconcludeerd wordt dat voor de Westerschelde een verdieping van invloed kan zijn op de (verandering van) de getij-asymmetrie middels een afname van de vloeddominantie.

Recent is nagegaan in hoeverre de waargenomen verandering van sterke import → import → export in de Westerschelde aan de hand van bodems voor 1970, 1983 en 2002 met Delft3D kon worden gereproduceerd. Geconcludeerd is, dat de verandering naar een export van sediment niet kon worden verklaard op basis van alleen de getij-asymmetrie (Bolle, 2006).

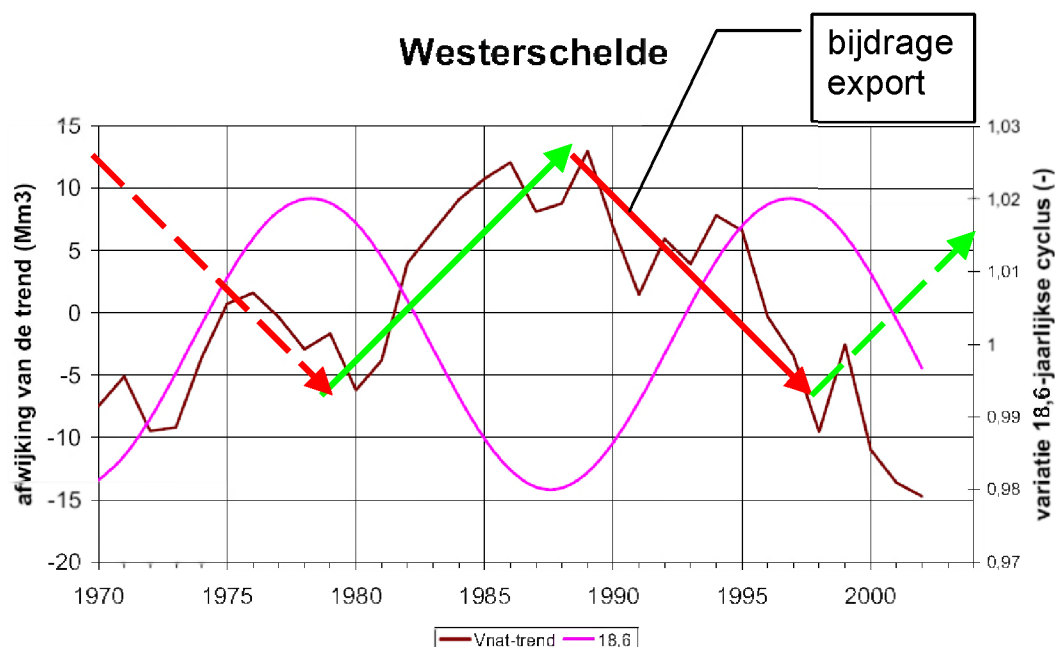
4. Asymmetrie van het horizontale getij

Naast de asymmetrie van het verticale getij is ook de asymmetrie van het horizontale getij van invloed op het netto transport van vooral fijn sediment. In de Westerschelde is de kentering van het horizontale getij 0,5 tot 1 uur na hoog- en laagwater. De waterstand gedurende hoogwaterkentering is daardoor groter dan tijdens laagwaterkentering. Rond hoogwaterkentering is nog een groot deel van het intergetijdengebied overstroomd en de stroomsnelheden zijn lager dan rond laagwaterkentering, wanneer de stroming zich meer concentreert in de geulen. Door de hogere concentraties van het gesuspendeerd sediment aan het begin van de vloedperiode ten opzichte van de concentraties aan het begin van de ebperiode ontstaat een netto transport in vloedwaartse richting. Dit mechanisme is in detail beschreven door Postma (1961). Vooral bij grote intergetijdengebieden leidt dit tot een accumulatie van relatief fijn sediment in deze gebieden en ontstaat een import van sediment. De import wordt verder versterkt door een vertraagde aanpassing aan de veranderende waterbeweging van de uitwisselingsprocessen met de bodem. Het vereist enige tijd voordat sediment vanuit de waterkolom de bodem bereikt indien de stroomsnelheid is afgenomen, terwijl erosie bij een toename van de stroomsnelheid pas optreedt na overschrijding van een kritische snelheid, zie Postma (1967).

5. Langjarige getijvariatie: 18,6 jaars periode

Door de 18,6 jaarsperiode van het getij ten gevolge van de verplaatsing van de knopen van de maanbaan varieert de amplitude van de M2-component (het dubbeldaagse maangetij) met ongeveer ± 4 procent. Maxima traden recentelijk op in de jaren 1959, 1978 en 1997. Tijdens deze jaren is de getijbeweging relatief groot geweest, wat geresulteerd kan hebben in een verruiming van de geulen en dus een afname van het zandvolume in de Westerschelde door export van sediment. Nederbragt en Liek (2004) hebben de variatie van het zandvolume in de Westerschelde geanalyseerd ten opzichte van een lineaire trend voor de periode 1971-2001.

De variatie van het zandvolume rondom de trend bedraagt ± 10 miljoen m^3 , zie onderstaande figuur voor het natuurlijke zandvolume, dat wil zeggen gecorrigeerd voor ingrepen. Uitgaande van een watervolume van de Westerschelde van 3.000 miljoen m^3 , zou het evenwichtsvolume een variatie van ± 120 miljoen m^3 vertonen. Omdat het systeem op de tijdschaal van de periodiciteit van 18,6 jaar nooit een evenwicht bereikt, zal de variatie in het actuele watervolume veel meer gedempt zijn.



Figuur 3.2: Cumulatieve natuurlijk zandvolume in de Westerschelde voor de periode 1971-2001 na correctie voor de lineaire trend en de variatie van de knoofactor (Nederbragt en Liek, 2004).

Hoewel de waarnemingsperiode relatief kort is, lijkt uit de variatie van het zandvolume (ten opzichte van een lineaire trend) te volgen dat sprake is van een toename tussen 1980 en 1988 bij een afname van de getijamplitude en van een afname van het zandvolume na 1988 ten gevolge van een toename van de getijamplitude. Een statistische analyse door Nederbragt en Liek gaf echter geen significante correlatie tussen beide tijdreeksen. De variatie van ± 10 miljoen m^3 impliceert dat de netto import/export circa $20/9,3 \approx 2$ miljoen m^3/jaar toe- en afneemt ten gevolge van de 18,6 jaars periodiciteit. Dit is van dezelfde orde als de waargenomen import en export volgens zandbalansen sinds 1970.

Uit simulaties met het morfologische model Estmorf door Jeuken et al. (2003a) blijkt dat het zandvolume van de Westerschelde een fluctuatie vertoont ten gevolge van de 18,6 jaars periode met een amplitude van 6 à 7 miljoen m^3 ofwel een variërende import/export ter grootte van $\pm 1,5$ miljoen m^3/jaar . Uit een theoretische analyse van Jeuken et al. volgt, dat de morfologie 4 à 5 jaar achter loopt op de forcering. Dit houdt in dat bij een maximale getijdynamiek rond 1997 het zandvolume minimaal zal zijn omstreeks 2001/2002. De volumeveranderingen, en dus de fluctuatie van de import/export ten opzichte van een langjarige trend, zijn dan eveneens minimaal. Recent opgestelde zandbalansen (HAECON, 2006) geven echter aan dat de export tussen 1999 en 2004 verder is toegenomen.

Geconcludeerd wordt dat de 18,6 jaar variatie wel een significante invloed heeft op de import/export van de Westerschelde en dus op de grootschalige zandbalans; zij kan echter niet de relatief grote export gedurende de laatste jaren (1999 tot en met 2004) verklaren.

6. Invloed van golven

Hoewel de sedimenttransporten in de Westerschelde vooral worden bepaald door de getijbeweging hebben golven eveneens een invloed op de morfologie. Waar het getij in het algemeen zorgt voor het opbouwen van de platen, heeft de golfwerking een afbraak tot gevolg. In Van der Weck (1994) wordt voor een aantal locaties in de Westerschelde het effect getoond van plaaterosie ten gevolge van stormen begin 1990. Het herstel van de platen bedroeg in het westen (oostzijde van de Hooge Platen) slechts twee maanden; de herstelperiode nam in oostwaartse richting toe. Uit vergelijkende metingen in de Oosterschelde bleek dat daar geen herstel optrad, vooral door de afgenomen getijdynamiek.

3.3 Meergeulensysteem

Het meergeulensysteem van de Westerschelde wordt gevormd door zes bochtgroepen (macrocellen), elk bestaand uit een eb- en vloedgeul, intergetijdengebieden en eventueel kortsluitgeulen. Het water wordt vooral getransporteerd door de eb- en vloedgeulen. Door de verschillende dieptes van deze geulen verschilt de voortplantingsnelheid van de getijgolf in beide hoofdgeulen. De verhangen in de waterstand, die hierdoor ontstaan, vormen, naast andere mechanismen, de aandrijvende kracht voor het ontstaan en gedrag van de kortsluitgeulen (Swinkels, 2006, en Swinkels et al, 2006). De kortsluitgeulen zorgen voor een herverdeling van water tussen de hoofdeb- en vloedgeulen. Zij vertonen in het algemeen een dynamisch gedrag, dat wil zeggen zij ontstaan, migreren en verdwijnen uiteindelijk, waarna een volgende cyclus start. Door de migratie van de kortsluitgeulen worden de platen laag gehouden en wordt voorkomen, dat zij aaneen groeien tot grotere plaatcomplexen. Intergetijdengebieden fungeren in een getijdenboek als een buffer voor sediment (bladzijde 219 in Dronkers, 2005). Bij een verdieping van de hoofdgeul als gevolg van een toename van het getijvolume, vindt netto transport naar de ondiepe gebieden plaats. Indien het getijvolume afneemt zullen de hoofdgeulen verondiepen; het sediment wordt geleverd door de intergetijdengebieden, waardoor deze gebieden weer in omvang afnemen. De verschillende deelaspecten van het meergeulensysteem worden hierna beschreven.

1. Gedrag van de hoofdgeulen

Een systeem van twee geulen in een getijdenboek kan instabiel gedrag vertonen. Een initiële verdieping van één van de geulen en een verondieping van de andere geul leidt tot verdere verdieping van de eerste en verondieping van de tweede geul. Dit proces wordt veroorzaakt door de hydraulische weerstand, welke in de sedimenterende geul voortdurend toeneemt en in de eroderende geul afneemt. Het gedrag wordt mede bepaald door transportmechanisme van sediment; in getijdensystemen met vooral suspensief transport zal instabiliteit van het geulensysteem eerder optreden dan in rivieren, waar met name sprake is van bodemtransport (bladzijde 61 in Dronkers, 2005). De aanleg van geleidingsdammen tussen de hoofd- en nevengeul in estuaria heeft geleid tot snelle sedimentatie van de nevengeul. Dit suggereert dat een meergeulensysteem niet blijft bestaan, indien de stroming haar tweedimensionale karakter verliest (bladzijde 57 in Dronkers, 2005). Een dergelijke situatie zou ook kunnen ontstaan, indien intergetijdengebieden tussen de hoofdgeulen aangroeien tot grote plaatcomplexen en toenemen in hoogte.

Het gedrag van tweegeulensystemen kan worden geanalyseerd met een stabiliteitsanalyse. Wang (2003) en Wang et al. (2005) hebben de stabiliteit van een tweegeulensysteem onderzocht, voor het geval dat baggeren en/of storten plaatsvindt in de geulen. De analyse geeft aan dat de stabiliteit van de geulen wordt beïnvloed door het stortvolume in één van de geulen. Indien langdurig meer dan ongeveer 10 procent van de bruto transportcapaciteit van het systeem wordt gestort in één van de geulen, zal degeneratie van deze geul optreden.

Alleen baggeren heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulensysteem. De combinatie van storten én baggeren in één macrocel reduceert het stortcriterium tot ongeveer 5 procent van de bruto transportcapaciteit. De bruto transportcapaciteit van het systeem is hierbij gedefinieerd als de som van de bruto transporten (dus ongeacht de richting) in beide geulen. Indien een geul al een natuurlijke erosie vertoont, kan meer worden gestort dan volgens het gegeven criterium. In de praktijk kan dan de totale erosie worden opgeteld bij het kritische stortvolume. Voor een sedimenterende geul moet het sedimentatievolume worden afgetrokken van het kritische stortvolume. Het stortcriterium is voor de Westerschelde geverifieerd met historische data (Jeuken, 2001, en Jeuken et al, 2003b).

2. Gedrag van de kortsluitgeulen

Door de, in het algemeen, grotere waterdiepte van de ebgeulen ten opzichte van de vloedgeulen is de voortplantingsnelheid van het getij in de ebgeul groter dan die in de vloedgeulen. De vloedgeulen zijn echter korter dan de ebgeulen, waardoor de voortplantingstijd in de vloedgeul korter is dan die in de ebgeul (met uitzondering van macrocellen 6 en 7 ten gevolge van de ondiepe vloedgeulen). Dit leidt ertoe, dat waterstandsverschillen tussen beide geulen ontstaan, welke het grootst zijn in het drempelgebied aan de landwaartse zijde van de vloedgeul (Swinkels, 2006). Deze waterstandsverschillen vormen de aandrijvende kracht voor het ontstaan en gedrag van kortsluitgeulen. Waterstandsverschillen kunnen ook het gevolg zijn van de stroming in bochten; zij leveren de benodigde kracht om de stroming van richting te doen veranderen. Een derde mechanisme dat waterstandsverschillen tot gevolg heeft, wordt gevormd door de Coriolis versnelling ten gevolge van de rotatie van de aarde. Waterstandsverschillen ten gevolge van bodemwrijving kunnen worden verwaarloosd (Swinkels, 2006). Swinkels (2006) concludeert, dat het dynamisch gedrag van de kortsluitgeulen vooral wordt bepaald door veranderingen in de getijvoortplanting ten gevolge van wijzigingen in de dieptes van de hoofdgeulen. De lengtes van de geulen veranderen weinig, omdat de geulen door de harde begrenzingen weinig vrijheidsgraden voor verplaatsing hebben. De beide andere mechanismen zorgen vooral voor de instandhouding van de kortsluitgeulen. Indien de vloedgeul sterk erodeert en/of de ebgeul sedimenteert worden de waterstandsverschillen groter. De omvang van de kortsluitgeulen neemt toe, wat kan leiden tot een bochtafsnijding en volledige erosie van het drempelgebied, zoals is opgetreden in macrocel 4 nabij Hansweert. In het drempelgebied van macrocel 5, waar de afmetingen van de kortsluitgeulen gevoelig zijn voor veranderingen in de waterstandsverschillen (zie figuur 3.3), zal een verdere verdieping, met storten in de vloedgeul, een grote invloed op het gedrag van de kortsluitgeulen kunnen hebben.

3. Gedrag van de intergetijdengebieden

De mechanismen die de uitwisseling tussen intergetijdengebieden en geulen beschrijven, zijn nog niet goed begrepen. Intergetijdengebieden ontstaan vooral in de binnenbochten van de geulen. Door horizontale en verticale circulaties wordt sediment van de buitenbocht naar de binnenbocht getransporteerd en de snelheid waarmee deze gebieden worden opgebouwd is gerelateerd aan de sterkte van de getijstroming. Geulen verdiepen en intergetijdengebieden bouwen op indien de getijstroming toeneemt en geulen verondiepen en intergetijdengebieden nemen af indien de getijstroming zwakker wordt (bladzijde 191 in Dronkers, 2005).

Dit werd waargenomen in de Oosterschelde na de afsluiting van de Grevelingen, toen de getijstroming 10 procent sterker werd en 20 jaar later na de bouw van de Oosterscheldedam, waardoor het getij weer 30 procent afnam. Een toename van de diepte van de getijgeulen en het oppervlak van de intergetijdengebieden; werd later gevolgd door een afname van de diepte en het areaal intergetijdengebied.

De afname van het intergetijdengebied was vooral het gevolg van golfwerking (bladzijde 217 in Dronkers, 2006). Bovenstaande illustreert de functie van intergetijdengebieden als berging of bron van sediment bij veranderende hydrodynamische condities, (zie tevens Waterloopkundig Laboratorium, 1996).

3.4 Sedimenthuishouding

Voor de sedimenthuishouding van een getijdenbekken is de netto import / export van belang. Een voortdurende netto import kan leiden tot verlanding, terwijl in het tegenovergestelde geval sprake is van verdrinking. Uiteraard bepalen ook andere componenten in de zandbalans, zoals zandwinning, de netto *zandvolumeveranderingen*. De netto import of export van een getijdenbekken wordt vooral bepaald door de getij-asymmetrie. De getij-asymmetrie wordt beïnvloed door de morfologie van het systeem. Indien de waterdiepte klein is ten opzichte van de getijamplitude en het areaal intergetijdengebied eveneens beperkt is, zal het systeem vloeddominant zijn; in dat geval treedt netto import op. Voor diepe getijdenbekkens met een geringe getijamplitude en een groot areaal intergetijdengebied is sprake ebdominantie en dus netto export van sediment. Veranderingen in de diepte, de getijamplitude en het oppervlak intergetijdengebied kunnen dus van invloed zijn op het netto sedimenttransport. Het watervolume van de Westerschelde is de afgelopen decennia toegenomen door zandwinning en de vaargeulverdiepingen. De toename in de gemiddelde diepte kan dus export van sediment hebben bevorderd (of de import hebben verminderd). De getij-asymmetrie bij Vlissingen/Breskens is de afgelopen periode echter weinig veranderd en leidt nog steeds tot vloeddominantie. De waargenomen omslag van import naar export in de Westerschelde kan hiermee dus niet worden verklaard. Mogelijk is deze omslag deels het gevolg van de natuurlijke variatie ten gevolge van de 18,6 jaars periode van het getij. De verandering in de grootte van het netto sedimenttransport in de mond van de Westerschelde kan orde 2 miljoen m³/jaar bedragen en is daarmee van dezelfde grootte als het netto transport zelf.

Ook kan de gewijzigde stortstrategie na de tweede verdieping (meer storten in het westen) en de verplaatsing van de zandwinning naar het oosten hebben bijgedragen aan een afname van de import cq. een toename van de export.

3.5 Onderzoekparameters

3.5.1 Kantelindex

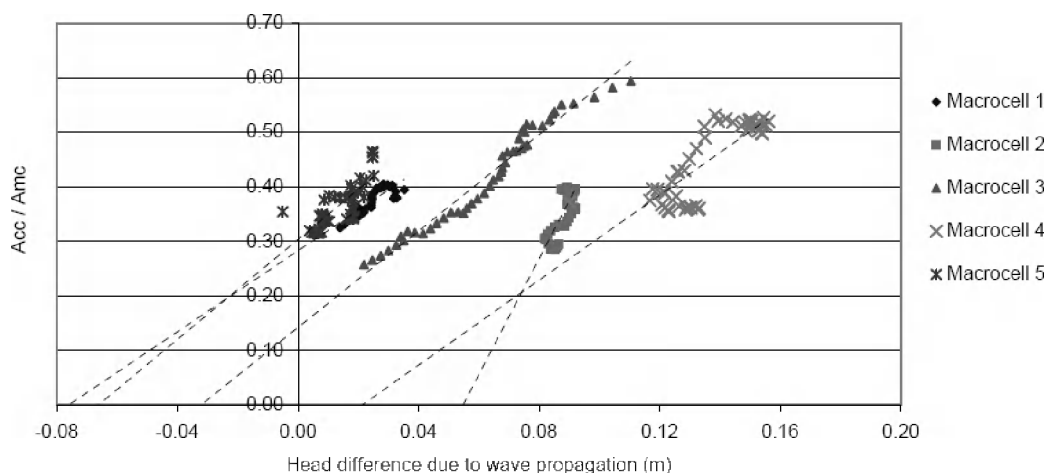
De kantelindex $K(t)$ betreft de verhouding tussen de gemiddelde diepte van de ebgeul (h_{EG}) en de diepte van de vloedgeul (h_{VG}):

$$K(t) = \ln \left(\frac{h_{EG}(t)}{h_{VG}(t)} \right) \quad (3.1)$$

Niet zozeer de kantelindex zelf als wel het verloop ervan, $dK(t)/dt$, is van belang. Het verschaft informatie over het gedrag van het meergeulensysteem op macrocel niveau: een functiewisseling van de eb- en vloedgeul of een degeneratie tot een ééngeulensysteem. Voor de kantelindex zijn de gemiddelde diepten van beide geulen van belang, welke volgen uit de volumes van de geulen gedeeld door de oppervlaktes. De volumes van de geulen worden bepaald ten opzichte van NAP-2 meter; de oppervlaktes volgen uit de schematisatie van macrocellen en eb- en vloedgeulen.

3.5.2 Verhangindicator

De verhangindicator⁶ in een macrocel betreft het waterstandsverschil tussen de hoofdeb- en vloedgeul ter plaatse van het drempelgebied van de vloedgeul, welke het gevolg is van het looptijdverschil van de getijgolf in de betreffende macrocel. Het beschrijft de veranderingen op mesoschaal niveau. De indicator wordt bepaald uit de gemiddelde diepten van de hoofdgeulen, welke volgt uit de gemeten of berekende bodems voor een bepaald jaar, en de lengte van de geulen. Op basis van historische waarnemingen is per macrocel een empirische relatie afgeleid tussen de verhangindicator en de grootte A_{cc}/A_{mc} , met A_{cc} het doorstroomoppervlak van de kortsluitgeul en A_{mc} het doorstroomoppervlak van het totaal van de hoofdeb- en vloedgeulen, zie figuur 3.3. De doorstroomoppervlakken worden bepaald ten opzichte van NAP-2 meter.



Figuur 3.3: Relatie tussen het doorstroomoppervlak van de kortsluitgeulen en het waterstandsverschil tussen hoofdeb- en vloedgeul ten gevolge van de getijvoortplanting.

⁶ Beter kan worden gesproken van een vervalindicator.

Een indicatie van de kritische waarde van het minimum verval dat nodig is om kortsluitgeulen in stand te houden, is het snijpunt van de gefitte curve met de x-as in figuur 3.3. Hoe steiler de gefitte lijn, hoe kleiner de verandering is, die in het verval mag optreden, voordat de aanwezigheid van kortsluitgeulen afneemt.

3.5.3 Stortcapaciteit

De stortcapaciteit van een geul in een macrocel, SC_M , wordt bepaald als:

$$SC_M = SC_0 - \Delta V_{tot} \quad (3.2)$$

Hierin is de parameter SC_0 de theoretische, maximale stortcapaciteit in een morfologisch niet veranderende geul (miljoen m³/jaar). Deze stortcapaciteit bedraagt 5-10 procent van de totale bruto sediment transportcapaciteit (eb + vloedtransport) door de twee grote geulen van een macrocel.

Het 5 procent-criterium is van toepassing als de andere geul in de macrocel verdiept ($\Delta V_{tot} < 0$) (al dan niet) als gevolg van baggeren. In alle andere gevallen is voor SC_0 het 10 procent-criterium van toepassing.

De stortcapaciteit geeft informatie op macroschaal niveau. Het geërodeerde of afgezette zandvolume, ΔV_{tot} , karakteriseert de totale morfologische ontwikkeling van een geul. Als een geul sedimenteert kan de stortcapaciteit SC_M een negatieve waarde krijgen. Een negatieve waarde betekent, dat er vanuit het oogpunt van waarborgen van de stabiliteit van het meergeulensysteem geen ruimte is om te storten in de geul.

3.5.4 Zandhuishouding

Voor de zandhuishouding wordt een zandbalans opgesteld, waarbij de natuurlijke volumeveranderingen, dat wil zeggen ten gevolge van de waterbeweging (V_{nat}), worden afgeleid uit de totale volumeveranderingen volgens de gemeten of berekende bodemkaarten (V_{tot}) en de volumeveranderingen welke het gevolg zijn van ingrepen, zoals baggeren, storten en zandwinning (V_i). Hierbij geldt:

$$V_{nat} = V_{tot} - V_i \quad (3.3)$$

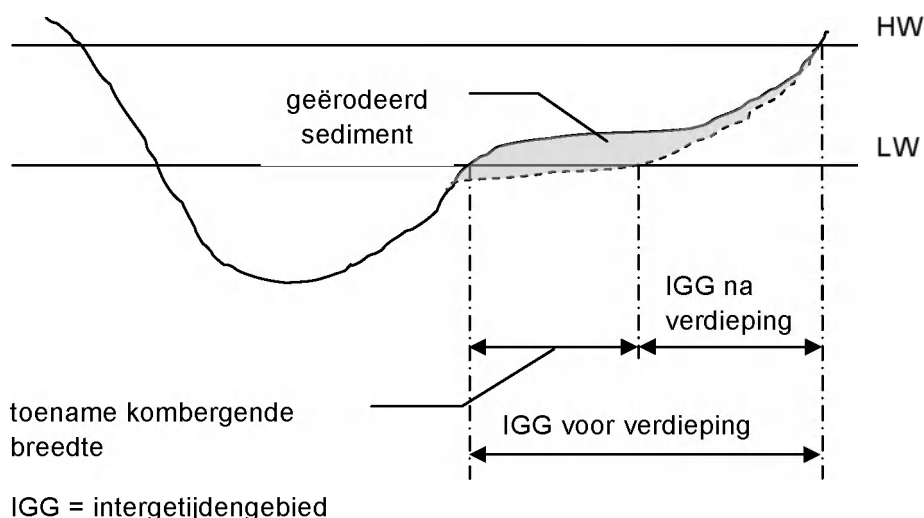
Uit de natuurlijke volumeveranderingen voor opvolgende deelgebieden volgen de natuurlijke netto sedimenttransporten tussen deze gebieden. De zandbalans wordt opgesteld op macrocel niveau maar geeft tegelijk informatie op megaschaal middels de netto sedimentuitwisseling ter plaatse van de mond van de Westerschelde. Langdurige export zou op termijn kunnen leiden tot verdrinking van het systeem, terwijl een import die groter is dan de zandwinning zou kunnen leiden tot verlanding.

4 Fenomenologische beschrijving effectingrepen

In dit hoofdstuk worden de effecten op de morfologie van verschillende ingrepen (verdiepen, baggeren/storten, zandwinning en inpolderingen) beschreven, zoals die in het verleden zijn uitgevoerd. De eerder genoemde onderzoeksparameters worden gebruikt om de effecten van deze ingrepen aan te duiden.

4.1 Effecten verdiepen

Een *initiële* verdieping zal resulteren in een afname van de stroomsnelheid, indien het getijvolume, zoals voor een kort getijdenbekken, niet verandert. Hierdoor treedt sedimentatie in de geul op, waarbij het sediment afkomstig is van de nabijgelegen intergetijdengebieden. De intergetijdengebieden zullen eroderen en de geul verkrijgt zijn oorspronkelijke diepte. Ook de stroomsnelheden worden weer gelijk aan de waarde vóór de verdieping. Door de afname van het oppervlak intergetijdengebied wordt vooral de voortplantingsnelheid van de getijgolf tijdens laagwater verminderd als gevolg van de toename van de kombergende breedte en dus het kombergend volume, zie onderstaande principeschets.



Als gevolg van de toegenomen waterberging en de reductie van de getijvoortplanting rond LW verkort de vloeduur ten opzichte van de ebduur, resulterend in een toename van import van sediment. De geul zal door de extra import verondiepen, waardoor de stroomsnelheden toenemen en erosie zal plaatsvinden. Het geërodeerde sediment wordt vervolgens weer gebruikt voor het herstel van de intergetijdengebieden. Dronkers (2005) beschrijft deze dynamische koppeling tussen diepteveranderingen van de geul en breedteveranderingen van het intergetijdengebied en leidt met behulp van een verstoringanalyse voor een karakteristiek getijdenbekken diverse tijdschalen af (decaden tot een eeuw) voor de morfologische respons van het systeem. Of en hoe snel de verstoringen uitdampen hangt af van de gekozen parameters in het model; voor lange bekkens kunnen de verstoringen zelfs toenemen.

In de Westerschelde is geen afname van de getijsnelheden in de hoofdebgeul waargenomen. Het verticale getij en het getijvolume lijken juist te zijn toegenomen, na de eerste verdieping met name in het oostelijke deel, wat is samengegaan met een verruiming van de geulen (over een periode van ongeveer 15 jaar), een toename van de sedimentatie in de intergetijdengebieden (platen) en een aaneengroeien van de platen tot grotere plaatcomplexen (Vroon, 1997). Het hiervoor beschreven model voor een kort getijdenbekken kan dus niet worden toegepast op een lang estuarium als de Westerschelde.

De verdieping van de geulen en het ophogen van de intergetijdengebieden leidt tot een versteiling van het estuarium. De toename van de getijbeweging kan het gevolg zijn geweest van een afname van de hydraulische ruwheid ten gevolge van de toegenomen diepte van de geulen. Deze toename compenseert de reductie van het kombergend volume ten gevolge van sedimentatie op de intergetijdengebieden, zoals waarnemingen aangeven (zie tabel 2.3). Ook het storten van baggerspecie in de nevengeulen kan geleid hebben tot een toename van de stroming door de hoofdgeul. In dat geval zal de gekozen stortstrategie dus mede bepalen of erosie van de ebgeul en sedimentatie in de intergetijdengebieden optreedt. Geconcludeerd wordt, dat de effecten van een verdieping op de morfologie in een lang getijdenbekken als het Schelde-estuarium op voorhand moeilijk zijn te voorspellen.

De verdieping van de ebgeul leidt tot een toename van de getijvoortplanting in deze geul. Hierdoor zal het waterstandsverschil tussen de eb- en vloedgeul in het drempelgebied van de vloedgeul afnemen (door de kortere vloedgeul is de looptijd in deze geul, ondanks de geringere waterdiepte, korter dan in de ebgeul). Volgens de relatie, welke is afgeleid op basis van historische waarnemingen (figuur 3.3), zal het stroomvoerend oppervlak van de kortsluitgeulen dan eveneens afnemen. In het uiterste geval zullen de kortsluitgeulen kunnen verdwijnen.

4.2 Effecten storten aanlegbaggerwerk

De aanlegbaggerspecie zal worden gestort op de westelijke (zeewaartse) punten van een aantal plaatcomplexen (onder andere Hooge Platen, Rug van Baarland en Plaat van Walsoorden). Het betreffen morfologisch inactieve gebieden, zodat verwacht wordt, dat het sediment voor een lange periode ter plaatse geborgen zal kunnen worden. Het sediment zal relatief hoog in het profiel worden opgeslagen (rond laagwater), waardoor extra intergetijdengebied wordt gecreëerd; de getijvoortplanting bij laagwater neemt hierdoor toe, waardoor de verhouding tussen de eb- en vloedduur afneemt en de ebdominantie wordt bevorderd. Het storten op ondiepe gebieden versterkt verder de natuurlijke tendens van een versteiling gedurende de afgelopen periode. Omdat de getijvoortplanting in zowel de eb- als de vloedgeul wordt beïnvloed, kan de relatieve looptijd in beide geulen toe- of afnemen. Het waterstandsverschil in het drempelgebied van de vloedgeul kan daarom groter of kleiner worden, waarmee de instandhouding van de kortsluitgeulen wordt bevorderd of tegengegaan.

Door het Waterbouwkundig Laboratorium van de Vlaamse overheid is eind 2004 een proefstorting uitgevoerd op de Plaat van Walsoorden (Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout, 2006). De resultaten van deze proefstorting geven aan dat een groot deel van het gestorte sediment gedurende een waarnemingsperiode van een jaar op de plaat wordt vastgehouden.

4.3 Onderhoudsbaggerwerk

1. Hoofdgeulen

Voor het storten van baggerspecie kan gekozen worden uit de volgende mogelijkheden:

- Het gebaggerd sediment uit de hoofdebgeul wordt gestort in de nevengeul van de macrocel;
- Het gebaggerd sediment in de hoofdebgeul wordt gestort in dezelfde hoofdgeul;
- Het gebaggerd sediment wordt gestort in de nevengeul van een andere macrocel. In de praktijk betekent dit, dat het sediment naar een westelijker locatie zal worden gebracht, conform de Oost-west strategie, zoals gehanteerd sinds de tweede verruiming.

De effecten van de verschillende strategieën laten zich beschrijven met een stabiliteitsanalyse voor een tweegeulensysteem, waarbij in één van de geulen wordt gestort in combinatie met baggeren in de andere geul, zie bijvoorbeeld Wang (2005).

a. Storten in de nevengeul; niet baggeren in de hoofdebgeul

Overschrijding van een kritische grens van de stortcapaciteit S_{crit} leidt ertoe, dat de hydraulische ruwheid in de nevengeul toeneemt, waardoor de stroomsnelheid reduceert en de transportcapaciteit afneemt. Er treedt een zichzelf versterkend effect op met als gevolg dat het tweegeulensysteem verandert in een systeem met slechts één geul open. De kritische grens voor de stortcapaciteit bedraagt orde 10 procent van de totale bruto transportcapaciteit van beide geulen (dat is de som van de eb- en vloedgeul). De situatie met alleen storten in de nevengeul zonder baggeren in de ebgeul doet zich voor, indien sediment wordt gebracht vanuit een macrocel waar gebaggerd wordt naar een macrocel waar geen baggeractiviteit plaatsvindt, bijvoorbeeld als onderdeel van een Oost-west strategie. De kritische grens van 10 procent is in relatieve zin groter dan voor geval *b*, maar de absolute stortcapaciteit wordt tevens bepaald door de grootte van de bruto transportcapaciteit van de ontvangende macrocellen de natuurlijke evolutie van de geul waar gestort wordt.

Het “kunstmatig transport” van oost naar west in het geval van een Oost-west strategie kan wel consequenties hebben voor het grootschalige transportpatroon. In het oosten wordt continu sediment onttrokken, waarbij de intergetijdengebieden vermoedelijk als bron zullen fungeren en eroderen. Indien de getijslag ten gevolge van de verdieping toeneemt door een afname van de ruwheid kan dit effect weer (deels) worden gecompenseerd als gevolg van een toename van de stroomsnelheid. In het westen vindt voortdurend suppletie plaats. De eb- en vloedgeulen zullen naar een nieuw evenwicht gaan en het gestorte volume zal in een evenwichtssituatie naar elders worden getransporteerd. Een deel kan hierbij worden getransporteerd naar de monding en aldus de export bevorderen.

b. Storten in de nevengeul; baggeren in de hoofdebgeul

Deze situatie doet zich voor, als het baggeren en storten binnen dezelfde macrocel plaatsvindt. Door het baggeren wordt het systeem (meer) uit evenwicht gebracht dan voor de situatie zonder baggeren. Het stortcriterium wordt dan orde 5 procent van de bruto transportcapaciteit van de macrocel. Indien de bruto transportcapaciteit van de macrocel gelijk is aan die van de macrocel waar wordt gestort voor geval *a*, volgt dus dat voor geval *b* minder kan worden gestort. In werkelijkheid verschillen de transportcapaciteiten van de macrocellen en wordt in de meeste macrocellen wel gebaggerd.

Het effect op het grootschalige transportpatroon (de netto transporten tussen de macrocellen) is in dit geval minder groot dan voor geval *a*. Het effect op de intergetijdengebieden zal minder groot zijn, omdat de netto onttrekking van sediment aan de macrocel nul is.

c. Baggeren in de hoofdegeul zonder storten in de nevengeul.

Alleen baggeren in de hoofdegeul zonder storten in de nevengeul van een macrocel doet zich voor bij bijvoorbeeld een Oost-west strategie. De stabiliteit van het geulenstelsel wordt niet beïnvloed door het baggeren. Wel vindt een netto onttrekking van sediment in de macrocel plaats, wat van invloed kan zijn op het grootschalige transportpatroon; eveneens kan een degeneratie van het intergetijdengebied optreden, indien het onttrokken sediment afkomstig is uit deze gebieden (zie geval a).

d. Baggeren en storten in de hoofdegeul

Voor deze situatie is de netto ingreep in de egeul nul en is er dus geen invloed op de stabiliteit van het geulenstelsel te verwachten. Wel zal het baggervolume kunnen toenemen, omdat sediment zal recirculeren in de richting van de baggerlocatie. Een relatie tussen baggerintensiteit en storthoeveelheid op dicht bij elkaar gelegen locaties werd door Kornman et al. (2002) niet gevonden, zie ook Peters et al. (2003). Modelsimulaties in het kader van het strategisch milieueffectenrapport (Winterwerp en Jeuken, 2004 en Jeuken et al, 2004)) geven aan, dat een toename van het onderhoudsbaggervolume optreedt, indien in de vaargeul wordt gestort.

De absolute stortcapaciteit van een macrocel wordt eveneens bepaald door de natuurlijke ontwikkeling van de geul waar gestort wordt. In een eroderende geul kan meer en in een sedimenterende geul minder worden gestort dan volgens het stortcriterium. In die gevallen kan de stortcapaciteit worden vergroot met het erosievolume respectievelijk worden verkleind met het sedimentatievolume.

2. Kortsluitgeulen

Baggeren in de egeul en/of storten in de vloedgeul veroorzaken een kanteling van de hoofdgeulen. De getijvoortplantingsnelheid in de egeul zal groter worden ten gevolge van de toegenomen diepte en kleiner worden in de vloedgeul door de afgenomen diepte. Hierdoor reduceert het waterstandsverschil ter plaatse van het drempelgebied van de vloedgeul en zullen de kortsluitgeulen in omvang afnemen. Een voorbeeld hiervan is macrocel 7, waar ten gevolge van de verdiepingen van de vaargeul de kortsluitgeulen (vrijwel) zijn verdwenen.

3. Intergetijdengebieden

Intergetijdengebieden fungeren als sedimentbuffer voor uit hun evenwicht gebrachte geulen. Door de kleine transportafstand kan deze sedimentbron maatgevend worden voor de verondieping van uitgebaggerde geulen, zeker als het gebaggerd materiaal verder weg wordt gebracht (Waterloopkundig Laboratorium, 1996). In Appendix D van Winterwerp et al. (2000) wordt op basis van een stabiliteitsanalyse voor een tweegeulensysteem, uitgebreid met een intergetijdengebied, geconcludeerd dat baggeren leidt tot een afbraak en storten tot een aangroei van platen.

4.4 Zandwinning

Zandwinning impliceert een netto onttrekking van sediment aan het systeem. Vroon (1997) concludeert, dat de directe effecten van zandwinning zeer beperkt zijn, maar dat de gevolgen voor de Westerschelde op de lange termijn wel van belang kunnen worden. Voor een tweegeulensysteem is zandwinning te beschouwen als baggeren in één van de geulen en daarmee identiek aan geval c in paragraaf 4.3.

Zandwinning heeft in dat geval geen effect op de stabiliteit van een macrocel. Indien in een macrocel wordt gestort, terwijl in de parallelle geul zandwinning plaatsvindt, zal het stortcriterium hierdoor kleiner worden (vergelijk geval *b*). Zandwinning in de geul waar ook wordt gestort zal de stortcapaciteit doen toenemen. De stortcapaciteit van een macrocel wordt dus mede bepaald door de zandwinning.

De zandonttrekking in de Westerschelde leidt tot een verruiming van het estuarium, omdat de zandwinning volgens de waarnemingen niet wordt gecompenseerd door een natuurlijke import. De invloed hiervan op de morfologie is vergelijkbaar met het effect van een verdieping, zoals beschreven in paragraaf 4.1. Indien de zandwinning leidt tot een afname van de getijsnelheden, treedt sedimentatie in de geulen op. Het sediment is afkomstig van de intergetijdengebieden, welke dus zullen eroderen. De geulen worden ondieper en het oppervlak intergetijdengebied neemt af, waardoor het estuarium vloeddominant wordt en sediment gaat importeren. De zandwinning wordt dus gecompenseerd door een extra import. Indien de verruiming ten gevolge van de zandwinning een toename van de getijsnelheden tot gevolg heeft, dan ontstaat het tegengestelde beeld. Door de grotere getijsnelheden eroderen de geulen en wordt het sediment geborgen op de intergetijdengebieden. Door de diepere geulen en het grotere areaal intergetijdengebied wordt het estuarium ebdominant en treedt export van sediment op. Er is dus sprake van een positieve terugkoppeling, dat wil zeggen het effect van de zandwinning wordt versterkt door een extra export.

4.5 Inpolderingen

Het effect van inpolderingen wordt beschouwd, onder de aanname dat vooral de breedte van het estuarium op het niveau van hoogwater wordt verkleind en het gebied rond laagwater niet wordt beïnvloed. De volgende beschrijving van de te verwachten morfologische veranderingen is ontleend aan Dronkers (2005, zie bladzijde 300). De afname van de kombergende breedte op het hoogwaterniveau leidt tot een toename van de voortplantingssnelheid van de hoogwater golf. Hierdoor wordt de vloedduur verkort en nemen de snelheden tijdens vloed toe ten opzichte van de snelheden tijdens eb. Deze toename is relatief, omdat het getijvolume zal afnemen ten gevolge van de reductie in komberging. Ten gevolge van de toegenomen vloeddominantie treedt import van sediment op, waarbij sediment eerst wordt afgezet in de geulen ten gevolge van het gereduceerde getijvolume.

De toename van de getijsnelheden in de geulen zal uiteindelijk weer leiden tot erosie van de geulen (er vindt nog steeds import van sediment plaats), waarbij de intergetijdengebieden weer sediment ontvangen en in volume toenemen. Dit duurt voort, totdat de voortplantingssnelheid tijdens hoogwater gelijk is aan die tijdens laagwater. De vloedduur is in dat geval gelijk geworden aan de ebduur en de netto import reduceert tot nul. In de nieuwe evenwichtsituatie is het geulvolume afgenomen, wat het gevolg is van een netto import vanuit de monding.

Uit bovenstaande beschrijving kan worden afgeleid, dat inpolderingen resulteren in een netto import van sediment. De afname van het areaal inpolderingen in het meer recente verleden kan dus hebben geleid tot een reductie van de import (of een toename van de export). Opgemerkt wordt, dat de locatie van de inpoldering van grote invloed kan zijn op de effecten en dat initiële effecten met betrekking tot erosie / sedimentatie kunnen verschillen van veranderingen op langere termijn (Jeuken et al, 2007).

4.6 Veranderingen van de onderzoeksparameters ten gevolge van ingrepen

In tabel 4.1 worden de effecten van de ingrepen, zoals beschreven in paragraaf 4.1 tot en met 4.5, kwalitatief weergegeven aan de hand van de gedefinieerde onderzoeksparameters in paragraaf 3.6.

Ingrep	Onderzoeksparameter			
	Kantelindex	Verhangindicator	Stort-capaciteit	Zandhuishouding
Verdieping	toename	afname	onduidelijk ¹⁾	import of export
Storten aanlegbaggerwerk	geen	toe- of afname	n.v.t.	export
Onderhoudsbaggerwerk	toename	afname	n.v.t.	import of export ²⁾
Zandwinning	toe- of afname	toe- of afname	toe- of afname	import of export
Inpoldering	toe- of afname ³⁾	toe- of afname ⁴⁾	geen ⁵⁾	import

¹⁾: Indien de getijsnelheden in de ebgeul toenemen en in de vloedgeul afnemen, neemt de stortcapaciteit van de vloedgeul af; in het tegenovergestelde geval neemt de stortcapaciteit toe,

²⁾: Storten in het westen kan leiden tot een toename van de export en kan dus de zandhuishouding beïnvloeden.

³⁾: Zowel de eb- als de vloedgeulen zullen verondiepen. De kantelindex neemt toe indien de ebgeul minder verondiept dan de vloedgeul. In het andere geval neemt de kantelindex af.

⁴⁾: De verandering van de verhangindicator hangt af van de grootte van de verondiepingen van de afzonderlijke geulen.

⁵⁾: De getijvolumes in de geulen nemen af tot de stroomsnelheden weer hun oorspronkelijke waarde verkrijgen. De transportcapaciteit is dan weer gelijk aan de situatie voor de inpoldering. Alleen als de debietverdeling tussen de eb- en vloedgeul wijzigt kan de transportcapaciteit en daarmee de stortcapaciteit veranderen.

Tabel 4.1: Veranderingen van de onderzoeksparameters ten gevolge van ingrepen.

5 Visie op de morfologische ontwikkeling

5.1 Redeneerlijn

Het doel van de Milieueffectrapport Verruiming vaargeul studie is de afweging van diverse varianten (bijvoorbeeld: waar wordt de aanlegbaggerspecie gedumpt, beleid ten aanzien van zandwinning) van de derde verruiming van het Schelde-estuarium en eventuele compenserende maatregelen (bijvoorbeeld de bagger-stortstrategie). De effecten van de verruiming, haar varianten en mitigerende maatregelen op het morfologisch systeem worden bestudeerd op basis van de systeemkennis van het consortium ARCADIS-Technum van het Schelde-estuarium, de beschikbare data, de morfologische expertise van het consortium ARCADIS-Technum en kennis van de literatuur, en met behulp van twee modellen, bijvoorbeeld Delft3D en Estmorf. De gangbare aanpak bij dit soort studies is om het effect van de ingrepen te bepalen ten opzicht van het huidige systeem, bijvoorbeeld de autonome ontwikkelingen van het Schelde-estuarium. Met name de genoemde modellen zijn zeer geschikt voor deze aanpak, in het bijzonder wanneer de effecten van de ingrepen niet al te groot zijn, en de gevraagde voorspellingshorizon niet al te lang. Daarbij geldt, dat voorspellingen van de morfologische ontwikkeling met behulp van modellen of anders op tijdschalen van jaren of meer aggregatie van de ruimteschalen vereist. Dit betekent, dat de morfologische ontwikkeling is beschouwd op mega- en macroschaal ofwel de schalen van de afzonderlijke bochtgroepen (macrocellen) en het gehele estuarium.

In de voorafgaande hoofdstukken is een evaluatie gepresenteerd van de verwachte effecten van de ingrepen op basis van de systeem- en morfologische kennis van het consortium ARCADIS-Technum en waarnemingen van de respons van het estuarium op eerdere ingrepen. Een evaluatie van het effect van de verruiming, haar varianten en mogelijke mitigerende maatregelen op het fysische (en eco-) systeem vraagt om begrip van het huidige systeem en haar “natuurlijke”, c.q. autonome ontwikkeling. Deze ontwikkeling is het gevolg van een groot aantal natuurlijke processen, zoals zeespiegelrijzing, verlanding, enzovoort, en een groot aantal in het verleden uitgevoerde ingrepen, zoals inpolderingen, zandwinning, baggeren en storten, enzovoort. De respons van het estuarium op deze ingrepen kent een grote variabiliteit aan tijd- en ruimteschalen, variërend van maanden tot een paar honderd jaar. Vooral op de langere tijdschalen kunnen processen belangrijk worden die op korte termijn secundair blijken te zijn – deze processen zijn bovendien vaak niet-lineair en genereren onbekende terugkoppelingen in het estuarium.

Momenteel bestaan er nog veel vragen over deze autonome ontwikkelingen en de invloed van diverse ingrepen daarop – dit is niet alleen het geval voor het Schelde-estuarium, maar speelt wereldwijd. Mede vanwege de complexiteit van het systeem en de onderliggende processen en forceringen leidt dit tot soms grote discrepanties in de perceptie van het gedrag van het Schelde-estuarium. Dit rapport geeft de perceptie van het consortium ARCADIS-Technum ten aanzien van de autonome ontwikkeling in relatie tot de verruiming, en met als doel de effecten van die verruiming in de context van de autonome ontwikkeling te kunnen plaatsen. Zoals opgemerkt is deze visie gebaseerd op de kennis van het consortium ARCADIS-Technum van het systeem, estuarien morfologisch gedrag in het algemeen en de beschikbare data. De hieronder volgende samenvatting kent een mate van onzekerheid, omdat een aantal processen én de respons van het estuarium op ingrepen nog niet goed begrepen zijn; dit impliceert eveneens dat de mate van onzekerheid in deze uitspraken momenteel niet gekwantificeerd kan worden.

In paragraaf 5.2 wordt een samenvatting gegeven van de waarnemingen, welke een beeld schetsen van de historische evolutie van het estuarium onder invloed van de natuurlijke forceringen en ten gevolge van menselijke ingrepen. Op basis hiervan en morfologische kennis van het systeem wordt de autonome ontwikkeling van het estuarium tot 2030 geschetst. De verwachte effecten van de verruiming van de vaargeul worden beschreven in paragraaf 5.3.

Het hiermee gepaard gaande baggeren en storten ten behoeve van het vaargeulonderhoud is mede van invloed op de sedimenthuishouding van het Schelde-estuarium. Met een flexibele bagger- en stortstrategie ontstaat de mogelijkheid, dat het morfologisch gedrag tot op zekere hoogte kan worden gestuurd, eventueel in combinatie met zandwinning. Hierop wordt eveneens in paragraaf 5.3 ingegaan als onderdeel van het dynamisch sedimentbeheer.

Tenslotte wordt opgemerkt, dat een verdere begripsvorming van het morfologisch functioneren van het estuarium vraagt om fundamenteel onderzoek, dat niet in het kader van lopende adviesprojecten wordt uitgevoerd. Hierbij moeten de mogelijkheden en beperkingen van de onderzoeksmiddelen (waarnemingen, expert kennis en onderzoeksmiddelen) worden onderkend. In paragraaf 5.4 wordt hierop ingegaan.

5.2 Autonome ontwikkeling

5.2.1 Gevolgtrekkingen op basis van waarnemingen

Op een tijdschaal van eeuwen heeft de Westerschelde zich ontwikkeld van een ondiep, sterk vertakt getijdenbekken tot een relatief regelmatig en diep estuarium. De Beneden-Zeeschelde en de Westerschelde worden omgeven door harde begrenzingen, welke de huidige vorm handhaven. Binnen de oevers wordt het gedrag van de geulen vooral bepaald door de getijbeweging en menselijke ingrepen. De geologische opbouw van de ondergrond kan hierop, door de aanwezigheid van moeilijk erodeerbare lagen, van invloed zijn.

De getijslag in het estuarium is de afgelopen eeuwen toegenomen. Deze toename heeft zich vooral in het oosten van Westerschelde versterkt doorgezet in de tweede helft van de 20^e eeuw. De getij-asymmetrie is in het westen van de Westerschelde weinig veranderd; in het oosten is de vloeddominantie afgenomen. De komberging en het hieruit afgeleide getijvolume zijn ter hoogte van Vlissingen gedurende de periode 1930-1990 kleiner geworden. Deze afname is vooral het gevolg geweest van inpolderingen en netto sedimentatie in de intergetijdengebieden (met name de platen). Tussen 1960 en 1990 is de invloed van inpolderingen afgenomen en de invloed van de verandering van de getijslag en de zeespiegelstijging toegenomen. Debietmetingen geven aan, dat het getijvolume in het westen tussen 1985 en 1995 is toegenomen. Gedurende de periode 1996-2006 (Holzhauer et al, 2006) is het getijvolume in het westen gelijk gebleven, terwijl in het midden en oosten een lichte stijging waarneembaar is. Het aandeel van de hoofdgeul in het totale getijvolume neemt hierbij toe.

Na 1960 bestaat het menselijk ingrijpen in het Schelde-estuarium vooral uit (i) verdiepingen van de vaargeul, (ii) het daarmee gepaard gaande baggeren en storten en (iii) de zandwinning (deze laatste al sinds het eind van de 19^e eeuw). Over de exacte duur van de verdiepingsperioden bestaat geen eenduidigheid. Voor de eerste verdieping is dit vermoedelijk de periode eind 60-er jaren tot en met 1979 geweest en voor de tweede verdieping de periode 1997 tot en met 2001. Tijdens de beide verdiepingsperioden zijn (de) drempels respectievelijk met 2,5 à 3 meter en 1 à 1,5 meter verdiept. Ook is tijdens de tweede verdieping de breedte van de vaargeul vergroot.

In de historische baggercijfers wordt geen onderscheid gemaakt tussen aanleg- en onderhoudsbaggerwerk. Na de tweede verdieping, gedurende de periode 2002 tot en met 2005 is het onderhoudsbaggerwerk afgenomen van circa 8 tot circa 6,5 miljoen m³/jaar. Het onderhoudsvolume is daarmee nog slechts weinig groter dan het volume vóór de eerste verdieping; de oorzaak van deze onverwachte afname is niet bekend.

Vooral tijdens de eerste verdieping is de verticale getijslag in het oostelijke deel van de Westerschelde sterker toegenomen dan tijdens de voorafgaande periode, en ook de tweede verruiming lijkt een soortgelijk effect tot gevolg te hebben. Na de tweede verruiming is de baggerspecie vooral in het midden en westen van de Westerschelde gestort.

Gedurende de periode 1955-2004 is circa 120 miljoen m³ zand onttrokken aan de Westerschelde, wat niet volledig is gecompenseerd door een natuurlijke import over de randen. Hierdoor is het estuarium vanaf ongeveer 1975 verruimd. Met name het watervolume van de hoofdgeulen is hierbij toegenomen (Holzhauer et al, 2006). Sinds 1991 concentreert de zandwinning van gemiddeld 2,5 miljoen m³/jaar zich in het oosten van de Westerschelde. Door de ingrepen (baggeren, storten en zandwinning) vindt een netto sedimentonttrekking plaats in het oosten van de Westerschelde en een netto zandsuppletie in het westen.

Zandbalansstudies geven aan dat de Westerschelde sinds de tweede helft van de 90-er jaren van de vorige eeuw exporterend is geworden. Deze export is inmiddels toegenomen tot meer dan 3 miljoen m³/jaar naar de monding. Recente gegevens laten zien dat ter plaatse van de Belgisch-Nederlandse grens eveneens een export vanuit de Westerschelde optreedt: sinds 1955 gemiddeld 1,2 miljoen m³/jaar en vanaf 1997 met 0,7 miljoen m³/jaar wat minder. Voor de meest recent opgestelde balansperiode is de omslag van een netto landwaarts naar een netto zeewaarts gericht transport ook opgetreden tussen macrocel 1 en macrocel 3. Deze omslag kan samenhangen met een toename van de getijdynamiek, de 18,6-jaarsperiode van het getij, de stort- en zandwinstrategie en mogelijke zandvraag van het mondingsgebied. Een directe, oorzakelijke relatie kan echter niet worden aangegeven. Voor het mondingsgebied lijkt een omslag van import naar export ter plaatse van de begrenzing met de Noordzee eerder te hebben plaatsgevonden dan ter plaatse van de overgang van de Westerschelde naar de monding. Het is onduidelijk hoe het mondingsgebied van invloed is op de zandhuishouding van de Westerschelde.

De geulen van de Westerschelde, met uitzondering van de ebgeul van macrocel 4, verdiepen sinds 1955 of blijven stabiel. Met name het watervolume van de hoofd(eb-)geulen is daarbij toegenomen. Verruimingen lijken, ook na de verdiegingsperioden, van invloed op de geulontwikkeling en de aanwezigheid van kortsluitgeulen. De afname van het zandvolume in de geulen gaat gepaard met een toename van het zandvolume van de platen sinds 1955, al is in het westen sinds 1980 sprake van een afname (het plaatvolume in het westen is in 2005 nog steeds groter dan in 1955). Het areaal ondiepwatergebied in de Westerschelde is vooral tussen 1960 en 1980 afgenomen; slechts een deel is hierbij omgezet in intergetijdengebied. Het areaal intergetijdengebied is echter sinds 1980 ook afgenomen. Het gevolg van deze ontwikkelingen op megaschaal is, dat het oppervlak van het voor de ecologie potentieel interessante gebied boven NAP-5 meter sinds tenminste 1955 is afgenomen (10 procent gedurende 50 jaar). De afname van het areaal ondiepwatergebied is daarbij relatief groot (35 procent in 50 jaar).

5.2.2 Grootschalige morfologische processen

Morfologische veranderingen kenmerken zich door een interactie tussen de waterbeweging, het sedimenttransport en de bathymetrie. De waterbeweging, welke in het Schelde-estuarium vooral wordt bepaald door het getij, heeft sedimenttransporten tot gevolg; gradiënten in deze transporten leiden tot bodemveranderingen. Deze bodemveranderingen zijn vervolgens weer van invloed op de getijvoortplanting.

Uit de asymmetrie van het verticale getij (eb- versus vloedduur) kan worden afgeleid of sprake is van vloed- of ebdominantie. In geval van vloeddominantie is de maximale profielgemiddelde snelheid tijdens vloed groter dan die tijdens eb, wat een netto landwaarts gericht netto transport waarschijnlijk maakt.

De vloed- en ebdominantie bepalen dus op megaschaal de morfologische ontwikkeling⁷. De asymmetrie van het verticale getij is het directe gevolg van een verschil in voortplantingsnelheid tijdens hoog- en laagwater. Deze voortplantingsnelheid wordt mede bepaald door de hypsometrie ofwel de geometrische kenmerken van het systeem: de diepte van de geulen en de aanwezigheid van intergetijdengebieden. Een diep estuarium in verhouding tot de getijamplitude met een groot areaal intergetijdengebied, dat is een grote waterberging buiten de geulen, resulteert in ebdominantie en kan leiden tot een exporterend systeem; bij een relatief ondiep estuarium in combinatie met een klein oppervlak van het intergetijdengebied (geringe waterberging) is sprake van vloeddominantie. Ingrepen als verdiepingen en inpolderingen van intergetijdengebieden beïnvloeden de geometrische kenmerken en daarmee de grootschalige zandhuishouding.

Op macroschaal uit de asymmetrie in het horizontale getij zich in de aanwezigheid van eb- en vloedgeulen, waarvoor geldt dat het ebvolume respectievelijk groter en kleiner is dan het vloedvolume. Tijdens hoogwaterkentering is de waterstand hoger dan tijdens laagwaterkentering en sedimentatie vindt vooral plaats op de intergetijdengebieden, waar de stroomsnelheden relatief gering zijn. Indien het areaal intergetijdengebied groot is ten opzichte van de totale oppervlakte kan dit leiden tot een netto import van sediment.

Zowel op mega- als op macroschaal spelen de intergetijdengebieden dus een belangrijke rol als berging voor sediment en kunnen zij van invloed zijn op het importerend / exporterend gedrag van het estuarium. Zij interacteren tevens met de geulen op macroschaal; erosie van de geulen leidt tot een opbouw van de platen en erosie van de intergetijdengebieden (met name door wind) tot sedimentatie in de geulen. Deze uitwisselingsprocessen zijn nog niet goed begrepen, maar kunnen wel van grote invloed zijn op het grootschalige gedrag van het systeem.

Kortsluitgeulen zijn dynamisch met een cyclisch gedrag van ontstaan, migreren en verdwijnen van de geulen. In macrocellen 3, 4 en 5 zijn de verschillen in de ontwikkeling van het intergetijdengebied mogelijk te relateren aan een ander gedrag van deze geulen. Verondersteld wordt dat kortsluitgeulen de platen laag houden en aldus de ophoging ten gevolge van de getijwerking compenseren. De veranderingen in de omvang van deze geulen lijken vooral te worden bepaald door het verschil in getijvoortplanting in de eb- en vloedgeulen.

⁷ Recent uitgevoerde modelsimulaties voor de Westerschelde met Delft3D hebben dit tot dusverre nog niet kunnen bevestigen (A. Bolle, 2006).

5.2.3 Synthese van waarnemingen en processen met betrekking tot verwachte ontwikkeling

De analyse van de observaties en de onderliggende grootschalige morfologische processen leidt, volgens het consortium ARCADIS-Technum, tot het volgende beeld met betrekking tot de autonome ontwikkeling van het morfologische systeem.

Op een tijdschaal van eeuwen is het estuarium verdiept en de getijvoortplanting veranderd. Door de resulterende verandering van de getij-asymmetrie kan hierdoor de vloeddominantie zijn verminderd, omdat de getijvoortplanting rond laagwater ten opzichte van hoogwater groter zal zijn geworden. Tegelijkertijd is door inpolderingen het areaal intergetijdengebied afgenomen, met name rond hoogwater. De toename van de getijvoortplanting rond hoogwater ten opzichte van laagwater leidt tot een versterking van de vloeddominantie. Afhankelijk van de grootte van de afzonderlijke effecten kan de vloeddominantie, en daarmee de netto import van sediment vanuit de monding, zijn toe- of afgenomen.

Het effect van de hierboven beschreven afname van de vloeddominantie ten gevolge van een verdieping is waargenomen tussen 1970 en 1987. Tijdens deze periode is de vaargeul met name in het oosten verruimd. In het midden en westen is de getij-asymmetrie sinds het begin van de 20^e eeuw nauwelijks veranderd (ook na de tweede verruiming zijn geen grote veranderingen opgetreden in de verhouding tussen de eb- en vloedduur). Op basis hiervan zouden dus geen veranderingen in de netto sedimentuitwisseling tussen de monding en de Westerschelde verwacht mogen worden. Informatie over de zandhuishouding vanuit waarnemingen zijn beschikbaar over de laatste 100 jaar. Gedurende deze periode is het estuarium importerend geweest, met uitzondering van het laatste decennium. Een eventuele afname van de import ten gevolge van het dieper worden van het estuarium is kennelijk gecompenseerd door de inpolderingen gedurende de afgelopen eeuwen. Omdat de inpolderingen geleidelijk in omvang zijn afgenomen, is het mogelijk dat het effect van de verruiming van het estuarium op de afname van de import (resultierend in een export) overheersend is geworden.

Het getijvolume in de mond van de Westerschelde lijkt over een periode van eeuwen weinig te zijn veranderd. Het effect van de grootschalige inpolderingen in het verleden, resulterend in een afname van de komberging, is gecompenseerd door een toename van de getijslag. De afgelopen decennia is de Westerschelde als geheel verruimd door zandwinning, terwijl door het baggeren van de drempels tijdens de eerste en tweede verruiming vooral de ebgeulen (= hoofdvaarweg) dieper zijn geworden. Deze door menselijk ingrijpen kunstmatige verdieping van het estuarium draagt bij aan de natuurlijke verruiming op een tijdschaal van eeuwen. Het estuarium heeft hierdoor een geringere hydraulische ruwheid verkregen, waardoor de getijgolf sneller het estuarium binnenloopt. De afname van de hydraulische ruwheid heeft eveneens geleid tot een toename van de getijslag. Door de grotere voortplantingsnelheid wordt het estuarium efficiënter gevuld en samen met de grotere getijslag heeft dit een toename van het getijvolume tot gevolg gehad. Dit laatste komt (nog) niet overtuigend naar voren uit de debietmetingen, maar volgt wel uit de bepaling van het kombergend volume voor de gehele Westerschelde voor de tijdvakken 1930-1960 en 1960-1990 (Vroon, 1997). De geulen zullen door een toename van het getijvolume verruimen, waardoor de netto sedimentatie in het intergetijdengebied (met name de platen) wordt vergroot en de export kan toenemen.

De waargenomen toename van het zandvolume van de platen en de optredende export onderschrijven dit beeld. Het dieper worden van de geulen door het toegenomen getijvolume leidt tot een afname van de vloeddominantie. Dit kan gecompenseerd zijn door de toename van het zandvolume van de intergetijdengebieden (platen) en dus een geringere waterberging in deze gebieden, wat een toename van de vloeddominantie tot gevolg heeft. In hoeverre beide effecten elkaar neutraliseren is tot op heden niet goed onderzocht.

Bovenstaande beschrijving van de ontwikkeling van de Westerschelde op mega- en macroschaal over de afgelopen decennia tot eeuwen zal, naar verwachting, in grote lijnen ook van toepassing zijn op de komende periode tot 2030. Dit houdt in dat de geulen verder zullen verdiepen en het zandvolume van de intergetijdengebieden (platen) zal toenemen. Deze versteiling van het estuarium gaat dan samen met een afname van het ondiepwatergebied. De zanduitwisseling tussen de Westerschelde en de monding wordt beïnvloed door een aantal factoren: de verandering van het getijvolume, de 18,6-jaar cyclus van het getij, de stortstrategie en de zandwinning. Een verdere toename van het getijvolume resulteert in het verruimen van de geulen en een bijdrage aan de export naar de monding (en een transport naar de intergetijdengebieden). Ten gevolge van de 18,6-jaar cyclus van het verticale getij wordt verwacht, dat gedurende de periode 1997-2006, met een afnemende amplitude van deze getijcomponent, de export geleidelijk afneemt. Deze verandering in het netto zandtransport zal dan een aantal jaren na-ijlen op de verandering van de getijforcering. Voor de opvolgende perioden van 9,3 jaar wordt verwacht dat de export afwisselend weer toe- en afneemt.

De recent opgestelde zandbalans voor de periode 1999-2004 laat echter geen afname maar juist een toename van de export zien ten opzichte van eerdere balansperioden. Over dit aspect bestaat dus nog onzekerheid, deels omdat het mede wordt beïnvloed door de netto ingrepen; voortzetting van het huidige stort- en zandwinbeleid (netto storten in het westen en zandwinning in het oosten) versterkt mogelijk de netto export.

Hoewel met de voorafgaande beschrijving getracht is een consistent beeld te geven van de grootschalige morfologische ontwikkeling van de Westerschelde, zowel op basis van een analyse van waarnemingen als met gebruik van algemene concepten, kan geen zekerheid worden gegeven over de geschetste autonome ontwikkeling. Wel is op deze wijze de visie van het consortium ARCADIS-Technum verwoord met betrekking tot het functioneren van het morfologische systeem. Deze visie vormt de basis voor de wijze waarop met modelsimulaties de effecten van de derde verruiming en een flexibele stortstrategie worden onderzocht en geïnterpreteerd.

5.3 Verruiming van de vaargeul

De effecten van de vaargeulverruiming hebben betrekking op een eenmalige verdieping/verbreding, welke een verandering van de geometrie met zich meebrengt, en een continue verplaatsing van sediment voor het onderhoud van de geul met implicaties voor de systeemkenmerken op mega-, macro- en mesoschaal.

5.3.1 Effecten van de aanleg van de verdieping

In het verlengde van de waarnemingen na de eerste en tweede verdieping/verruiming wordt verwacht, dat ook de derde verruiming een toename van het verticale getij tot gevolg zal hebben. De getij-asymmetrie zal door de verdieping kunnen afnemen resulterend in een afname van de vloeddominantie en dientengevolge een afname van de netto transporten in vloedwaartse richting. Het getijvolume zal als gevolg van de geringere hydraulische weerstand toenemen en tot gevolg hebben dat de geulen verder verruimen. Een deel van het vrijkomende sediment veroorzaakt een toename van het zandvolume van het intergetijdengebied (platen). De opbouw van het intergetijdengebied vermindert de waterberging buiten de geulen en bevordert de vloeddominantie en daarmee de import. Hiermee wordt het effect van de verdieping tegengegaan (negatieve terugkoppeling).

Door het geringere looptijdverschil van de getijgolf tussen de eb- en vloedgeul zal de aanwezigheid van kortsluitgeulen op een aantal plaatsen kunnen afnemen. De intergetijdengebieden zullen hierdoor de gelegenheid krijgen meer op te bouwen.

Bovenstaande kwalitatieve beschrijving van het effect van de verdieping geeft de principe effecten weer. Over de grootte van de effecten kunnen geen uitspraken worden gedaan, maar vermoedelijk zijn de effecten klein ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

5.3.2 Effecten van het vaargeulonderhoud

De sedimenthuishouding van het systeem kan worden (bij)gestuurd met het baggeren en storten en de zandwinning. Kennis van het morfologisch functioneren van een tweegeulensysteem geeft aan, dat de storthoeveelheid in een geul bepaald wordt door (i) de bruto transportcapaciteit van de macrocel, (ii) het natuurlijke gedrag (natuurlijke erosie of sedimentatie) en (iii) de ingrepen in de parallelle geul (baggeren of zandwinning). De stortcapaciteit neemt toe met de transportcapaciteit van de macrocel, het erosievolume van de geul waar wordt gestort en neemt af met de intensiteit van baggeren en /of zandwinning in de parallelle geul.

Baggeren en storten zijn tevens van invloed op het intergetijdengebied; een verdieping van de geul ten gevolge van baggeren resulteert in een afbraak van de platen, en storten tot een aangroei. Indien de verdieping echter tot een toename van de stroomsnelheden in de geul leidt door het aantrekken van de stroming, zal de reactie van het intergetijdengebied op het baggeren een tegengestelde tendens kunnen vertonen. Veranderingen in de diepte van de geulen en in het areaal intergetijdengebied kunnen weer van invloed zijn op de morfologische veranderingen op megaschaal middels de getij-asymmetrie. Op macroschaal niveau kan door het baggeren en storten de getijvoortplanting in de hoofdgeulen veranderen en daarmee de aanwezigheid van kortsluitgeulen en de ontwikkeling van intergetijden- en ondiepwatergebieden beïnvloed worden. Storten in de geul waar ook gebaggerd wordt zal een relatief kleine invloed hebben op het morfologische systeem, al zal dit kunnen leiden tot een toename van het baggervolume. Indien gebaggerd sediment op grotere afstand wordt gestort, bijvoorbeeld in een andere macrocel, verandert de zandhuishouding op megaschaal, waardoor de import / export van het systeem kan wijzigen.

Samenvattend geldt, dat het baggeren en storten van invloed is op de systeemkenmerken op mega-, macro- en mesoschaal. Daarmee ontstaat in principe de mogelijkheid de morfologische ontwikkeling van het systeem te beïnvloeden met de locaties waar gestort wordt en de storthoeveelheden.

Bij het zoeken naar een optimale stortstrategie zal gekozen kunnen worden uit:

- (i) storten in de nevengeul van de macrocel waar gebaggerd wordt,
- (ii) storten in de hoofd(eb-)geul van de macrocel waar gebaggerd wordt,
- (iii) storten in de geulen van een andere macrocel en
- (iv) een combinatie van (i) tot en met (iii).

5.3.3 Dynamisch sedimentbeheer

Sedimentbeheer wordt gedefinieerd als het actief menselijk ingrijpen in de sedimenthuishouding van een systeem om een bepaalde gewenste morfologische ontwikkeling te realiseren of een ongewenste ontwikkeling te neutraliseren. Tijdens dit proces wordt voortdurend gewaakt over het systeem en worden ingrepen bijgestuurd, indien ontwikkelingen dat nodig maken. Het sedimentbeheer krijgt hierdoor een dynamische component.

Een flexibele stortstrategie houdt in, dat bij het storten van baggerspecie (hoofdzakelijk specie voor het onderhoud van de vaargeul) een zekere vrijheid bestaat in de keuze van stortlocaties, -hoeveelheden en tijdstippen. Deze vrijheid wordt bepaald door de beschikbare ruimte in het systeem en de totale hoeveelheid te storten sediment. Hierbij kan tevens zandwinning worden meegenomen als sturende factor voor de morfologische veranderingen. Drie situaties worden beschouwd:

a. Baggeren in de hoofdgeul en storten in de nevengeul van dezelfde macrocel

De stortcapaciteit in de nevengeul van de macrocel, waar tevens wordt gebaggerd, wordt bepaald door het bruto sedimenttransport in de macrocel en de evolutie van de geul (netto sedimentatie of erosie). Zolang de storthoeveelheid de stortcapaciteit niet overschrijdt, heeft het storten geen invloed op de stabiliteit van het geulenstelsel (er kunnen wel diepteveranderingen optreden in beide geulen). De relatieve sedimentatie (bijvoorbeeld ook afname erosie) van het intergetijdengebied kan toenemen en er is een mogelijke invloed op de aanwezigheid van kortsluitgeulen. Omdat het baggeren en storten in dezelfde macrocel plaatsvindt, is het effect op de grootschalige zandhuishouding relatief beperkt. Zandwinning in de nevengeul geeft een reductie van het netto stortvolume; de invloed van het storten op het morfologisch systeem zal daarmee afnemen.

Zandwinning in de hoofdgeul leidt tot een toename van de netto onttrekking. Dit heeft geen invloed op de stabiliteit van het geulenstelsel. Wel zal de erosie van het intergetijden- en ondiepwatergebied kunnen toenemen en is er een mogelijke beïnvloeding van de kortsluitgeulen.

b. Baggeren en storten in de hoofdgeul

Indien een deel van het gebaggerde materiaal ook gestort wordt in de hoofdgeul, dat wil zeggen de geul waar ook wordt gebaggerd (meestal de ebgeul; in macrocel 4 de vloedgeul), zullen de morfologische effecten kleiner zijn dan voor geval a, omdat de netto ingrepen kleiner worden. Wel zal het baggervolume toenemen, omdat sediment vooral vanuit de geul naar de drempels zal worden getransporteerd. De invloed op de intergetijdengebieden en de kortsluitgeulen zal kleiner zijn dan voor de situatie, dat gestort wordt in de nevengeul. De invloed op de zandhuishouding, de netto sedimenttransporten tussen de macrocellen, zal relatief beperkt zijn. Zandwinning in de nevengeul reduceert het netto stortvolume, vermindert de kanteling van de geulen en heeft dus een positieve invloed op de stabiliteit van het geulenstelsel. Zandwinning in de hoofdgeul vergroot de netto onttrekking in deze geul, maar heeft verder geen consequenties voor de stabiliteit van deze geulen. Zandwinning in de macrocel zal de erosie van het intergetijdengebied doen toenemen en tevens van invloed kunnen zijn op de aanwezigheid van kortsluitgeulen.

c. Baggeren in de hoofdgeul en storten in de nevengeul van een andere macrocel

Indien gebaggerd wordt in de hoofdgeul en het materiaal wordt gestort in de nevengeul van een andere macrocel wordt de stortcapaciteit bepaald door het bruto transport in de 'ontvangende macrocel'. Zolang het stortcriterium niet wordt overschreden is er geen invloed op de stabiliteit van het geulenstelsel in deze macrocel. De stabiliteit van de geulen in de macrocel waar wordt gebaggerd wordt niet beïnvloed. In beide macrocellen kan er een invloed zijn op het intergetijdengebied en de kortsluitgeulen. Het effect op de zandhuishouding zal groter zijn dan voor de vorige gevallen, omdat de sedimentuitwisseling tussen de beide macrocellen wordt beïnvloed. Met betrekking tot de effecten van zandwinning gelden dezelfde overwegingen als voor de gevallen a en b.

Indien de morfologische ontwikkelingen het noodzakelijk maken, dienen de stortlocaties en -hoeveelheden aangepast te worden. Waarnemingen geven aan dat veranderingen op een tijdschaal van enkele jaren optreden, indien de stortcapaciteit van een geul wordt overschreden. Deze tijdschaal wordt bepaald door het geulvolume en het bruto sedimenttransport in de macrocel.

5.4 Integratie van observaties, kennis en modellen

Voor het verantwoord ingrijpen in de morfologie van het estuarium is kennis nodig van processen. Met de beschikbare morfologische kennis kunnen weliswaar principe-effecten van ingrepen worden beschreven, maar uitspraken hebben vaak betrekking op sterk geschematiseerde situaties. Voor specifieke, lokale ingrepen in complexe geometrieën kunnen met numerieke modellen kwantitatieve uitspraken over effecten worden gedaan. Hierbij geldt als noodzakelijke voorwaarde voor het geven van betrouwbare voorspellingen, dat de relevante processen adequaat door het model moeten worden beschreven. De voorspelkracht van een model dient te worden getoetst aan de hand van een terugvoorspelling van historische observaties. Waarnemingen zijn eveneens nodig om de kennis van het systeem verder te verdiepen en om de effecten van ingrepen vast te stellen.

Voor dit laatste wordt momenteel een uitgebreid monitoringprogramma opgezet in het kader van MONEOS-T. Het is echter niet eenvoudig de effecten van dergelijke ingrepen te isoleren van overige wijzigingen in het systeem.

Vooraf voor morfologische processen geldt dat de tijdschaal van een respons op een ingreep of een forcering groot kan zijn en dat de effecten van meerdere ingrepen tegelijkertijd kunnen optreden. Effecten worden vaak pas na langere tijd merkbaar, waardoor niet adequaat kan worden ingespeeld op ongewenste ontwikkelingen. De beschikbare numerieke modellen (Estmorf en Delft3D) integreren beschikbare kennis en kunnen worden toegepast om het morfologisch functioneren van het Schelde-estuarium nader te onderzoeken.

In tabel 5.1 worden de mogelijkheden en beperkingen van de onderzoeksmethodieken samengevat:

Onderzoeksmiddel	Mogelijkheden / gebruik	Beperkingen
Waarnemingen	• Bijdragen aan proceskennis en systeeminzicht. • Validatie van modellen. • Monitoring van ontwikkelingen.	• Isoleren van effecten ten gevolge van ingrepen. • Lange waarnemingsperioden nodig ten gevolge van grote tijdschalen van processen. • Geen extrapolatie.
Kennis	• Hypothesen en opstellen ingreep-effect relaties. • Analyse observaties en modelresultaten.	• Sterke schematisatie van ingrepen en globaal beeld effecten. • Geen kwantitatieve uitspraken.
Modellen	• Kwantitatieve uitspraken over geïsoleerde effecten van specifieke ingrepen. • Uitbreiding systeeminzicht.	• Beschikbaarheid of nauwkeurigheid van procesbeschrijvingen. • Geen lange termijn uitspraken van grote ingrepen op kleine ruimteschalen.

Tabel 5.1: *Mogelijkheden en beperkingen van de onderzoeksmiddelen.*

Principesimulaties met modellen kunnen inzicht geven in de effecten van veranderingen in de geometrische kenmerken van het systeem op de hydrodynamica en morfologie van het systeem. Dit kan gedeeltelijk worden uitgevoerd met geschematiseerde systemen.

6 Referenties

- Allersma, E., 1992**, Studie inrichting Oostelijk deel Westerschelde. Analyse van het fysisch systeem, WL | Delft Hydraulics. Rapport Z368.
- Aubrey, D.G., P.E. Speer, 1985**, A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet / estuarine systems, Part I: observations, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 21, pp. 185-205.
- Belmans, H., 1988**, Verdiepings- en onderhoudsbaggerwerken in Wester- en Zeeschelde. Water nr. 43, pp. 184-194.
- Belmans, H., 1995**, De verdieping van de Westerschelde. Water nr. 85, pp. 259-264.
- Belmans, H., Claessens, J., Marain, J., Bernard, A., 1989**, De baggerwerken in de Schelde en hun permanente optimalisatie, Water 49bis, pp. 239-254.
- Bolle, A., 2006**, Sediment Exchange between the Dutch Coast and the Western Scheldt, Report Z4169, December 2006.
- Claessens, J., 1988**, Het hydraulisch regime van de Schelde, Water nr. 43, pp. 163-169.
- Coen, I., 1988**, Ontstaan en ontwikkeling van de Westerschelde, Water nr. 43.
- Cohen, A. B., M.C.J.L. Jeuken, 2006**, LTV O&M, Verbetering van het 1D morfologisch model Sobek, Z3949, WL | Delft Hydraulics.
- Dekker, L., 2001**, MOVE: Datarapport getij en zout 2000. Memo.
- De Vree, A., 1997**, Van Poldersloot tot Wereldhaven, Aksis.
- Dronkers, J., 2005**, Dynamics of coastal systems, Advanced Series of Ocean Engineering, Volume 25, World Scientific.
- Guns, P., 1972**, Historische evolutie van het polderlandschap langs de linker Scheldeoever, Waterbouwkundig Laboratorium.
- HAECN, 2006**, Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Westerschelde, identificatienr. 1249760008/lvp, concept d.d. 01-09-2006.
- Holzhauser, H., B. van Eck, D. van Maldegem, E. Pareé, 2006**, Monitoring van de effecten van de verruiming 48°/43'. MOVE-Rapport 9, deel 1: Fysische hypothesen 2006. Onderliggende rapportage bij MOVE rapport 10 Eindrapportage 2006, Eindconcept versie 4, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg.
- Hoste S., Loyen R., 2002**, "Sauvons Anvers!" De maritieme toegangsweg van de haven van Antwerpen vanuit bedrijfshistorisch perspectief (1970-1940), NEHA jaarboek 2002.
- IMDC, 2001**, Studie in het kader van de habitat en –vogelrichtlijngebieden langs de Beneden-Zeeschelde. Evaluatiestudie met betrekking tot het terugstorten van baggerspecie in de Beneden-Zeeschelde I/RA/11203/01.018/MSA.
- IMDC, 2004**, Optimalisatie van de onderhoudsbaggerwerken Deurganckdok. Hoofdrapport: Onderzoek naar de effecten op het milieu van het terugstorten van baggerspecie in de Beneden-Zeeschelde. I/RA/11239/04.020/CMA. In opdracht van Gemeentelijk Havenbedrijf Antwerpen.
- IMDC, 2006a**, LTV O&M actieplan voor morfologisch onderzoek modelinstrumentarium. Mike11, Report 1, Hydrodynamic model, I/RA/11278/06.014/FPE.
- IMDC, 2006a**, LTV O&M actieplan voor morfologisch onderzoek modelinstrumentarium. Mike11, Report 2, Morphologic model, I/RA/11278/06.015/FPE.
- IMDC, 2007**, Vijftig jaar veranderingen in de Zeeschelde, I/RA/11282/07.051/MSA, (in voorbereiding).
- Jeuken, M.C.J.L., 2001**, Verificatie van het cellenconcept op basis van historische gegevens, rapport Z3078, WL | Delft Hydraulics.
- Jeuken, M.C.J.L., Z.B. Wang, D. Keiller, I. Townend, G.A. Liek, 2003a**, Morphological response of estuaries to nodal tide variation. In: Proc. Int. Conf. Estuaries and Coasts, Hangzhou, China, pp. 166-173.

Jeuken, C. I. Tánčzos en Z.B. Wang, 2003b, Evaluatie van het Huidige Bagger-, Stort- en Zandwinbeleid met behulp van het Onderbouwde Cellenconcept Westerschelde. WL | Delft Hydraulics

Jeuken, M.C.J.L., Z.B. Wang, T. van der Kaaij, M. van Helvert, M. van Ormondt, R. Bruinsma en I. Tánčzos, 2004, Morfologische Ontwikkeling in het Schelde Estuarium bij Voortzetting van het Huidige Beleid en Effecten van een Verdere Verdieping van de vaargeul en Uitpoldering langs de Westerschelde. Consortium ARCADIS – Technum

Jeuken, M.C.J.L., Z.B. Wang, D. Keiller, 2007, Impact of setbacks on the estuarine morphology, 5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM 2007.

Jong, H. de, 1989, Debietgegevens van de Westerschelde vanaf 1932. nota GWA0-89.1004, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren.

Kornman, B., G.A. Liek en H. Schippers, 2002, Baggeren en storten in de Westerschelde, een nieuwe kijk op onderhoudsbaggerwerk. Werkdocument RIKZ/AB/2002.840x. Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg.

Kraker, A.M.J. de, 1997, Landschap uit balans. De invloed van de natuur, de economie en de politiek op de ontwikkeling van het landschap van de Vier Ambachten en het Land van Saeftinge tussen 1488 en 1609. Uitgeverij Matrijs. Utrecht.

Kramer, J. de, 2002, Waterbeweging in de Westerschelde, een literatuurstudie. ICG-rapport 02/6, Universiteit Utrecht, Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen, ISBN 90-77079-08-4.

Kuijper, C., Steijn, R., Roelvink, D., Kaaij, T. van der, Olijslagers, P., 2004, Morphological modelling of the Western Scheldt. Validation of delft3d, Z3648/A1198, WL | Delft Hydraulics / Alkyon.

Kuijper, C., T. van der Kaaij, E. de Goede, 2006, LTV O&M actieplan voor morfologisch onderzoek modelinstrumentarium. Delft3D, Z3950, WL | Delft Hydraulics.

LTV, 2001, Langetermijnvisie Schelde-estuarium met toelichting (LTV 2030). Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat Directie Zeeland en Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap.

Meyvis, L., 1977, Indijkingen en waterbouwkundige werken langs de Westerschelde en de Zeeschelde, Deel I, Verslag AZ 77-12.

Nederbragt, G. en G.A. Liek, 2004, Beschrijving zandbalans Westerschelde en monding, Rapport RIKZ/2004.020, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg.

PAET, 2004, Proposals for managing the morphology of the Westerschelde, Port of Antwerp Expert Team (draft).

Peters, B.G.T.M., G.A. Liek, J.W.M. Wijsman, M.W.M. Kuijper en G.Th. van Eck, 2003, Monitoring van de effecten van de verruiming 48'/43'. Een verruimde blik op waargenomen ontwikkelingen.

MOVE Evaluatierapport 2003, MOVE-rapport 8, Deel B: Hoofdrapport.

Postma, H., 1961, Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea, Neth. J. Sea Research 1, 148-190.

Postma, H., 1967, Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In: Estuaries. Ed., G.H. Lauff, 158-179.

Swinkels, C., 2006, Presence of Connecting Channels in the Western Scheldt Estuary. Investigations of a morphologic relationship between main and connecting channels. Report Z4057.

Swinkels, C., C.M.J.L. Jeuken, Z.B. Wang, R. Nicholls, 2006, Presence of Connecting Channels in the Western Scheldt Estuary. A morphologic relationship between main and connecting channels. Submitted to Journal of Coastal Research.

Technische Scheldecommissie, Subcommissie Westerschelde, 1984, Verdieping Westerschelde, Studierapport Programma 48'-43', Middelburg-Antwerpen.

Theuns, J., 1975, De waterbouwkundige problematiek van de Westerschelde en geplande infrastructuurwerken, De Gouden Delta 2, pp. 31-62.

Van Braeckel A., Piesschaert F., Van den Bergh E., 2006, Historische analyse van de Zeeschelde en haar getijgebonden zijrivieren (19^{de} eeuw tot heden), INBO.R.2006.29 (draft)

-
- Van den Berg, J.H., M.C.J.L. Jeuken, A.J.F. Van der Spek, 1996**, Hydraulic processes affecting the morphology and evolution of the Westerschelde estuary. In: Estuarine shores: evolution, environments and human alterations, K.F. Nordstrom en C.T. Roman (red), John Wiley & Sons Ltd, Pag. 157-184.
- Van der Spek, A.J.F. van der, 1994**, Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands, PhD-thesis, Universiteit van Utrecht.
- Van der Spek, A.J.F. van der, 2000**, Historische ontwikkeling Westerschelde en Voordelta, In: Langetermijnvisie Schelde-estuarium cluster morfologie, deel 2, Appendix A, WL|Delft Hydraulics.
- Van Veen, J., 1950**, Eb-en vloodschaar systeem in de Nederlandse Getijdenwateren. Tijdschrift Koninklijk Aardrijkskundige Genootschap, Vol. 67, pp. 303-325.
- Vroon, J., C. Storm, J. Coosen, 1997**, Westerschelde, stram of struis? Eindrapport van het project Oostwest, een studie naar de beïnvloeding van fysische en verwante biologische patronen in een estuarium. Rapport RIKZ-97.023. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Middelburg.
- Wang, Z.B., 2003**, Further validation and improvement of the cell concept, report Z3288, WL | Delft Hydraulics.
- Wang, Z.B., C. Jeuken, H.J. de Vriend, 1999**, Tidal asymmetry and residual sediment transport in estuaries. A literature study and application to the Western Scheldt, Report Z2749, WL|Delft Hydraulics.
- Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken, J.C. Winterwerp, 2005**, Impact of dredging and dumping on the stability of ebb-flood channel systems - Theory, Journal of Geophysical Research (submitted).
- Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken, H. Gerritsen, H.J. de Vriend, B.A. Kornman, 2002**, Morphology and asymmetry of the vertical tide in the Westerschelde estuary, Continental Shelf Research, 22, pp. 2599-2609.
- Wang, Z.B., M.C.J.L. Jeuken, 2006**, LTV O&M, Verbetering van het Estmorf model voor het Schelde-estuarium. Uitbreiding van het model met de Beneden-Zeeschelde en een verificatie van het model op basis van waarnemingen voor de periode 1990-2002, Z3949, WL | Delft Hydraulics.
- Wartel, S., 1972**, Sedimentologisch Onderzoek van de opbouw van het Schelde-estuarium, Proefschrift voorgedragen voor de graad van Doctor in de Wetenschappen, katholieke Universiteit Leuven, Instituut voor Aardwetenschappen.
- Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout, 2006**, Alternatieve stortstrategie Westerschelde. Proefstorting Walsoorden. Eindevaluatie monitoring.
- Waterloopkundig Laboratorium, 1996**, Kwaliteitstoets Oost-west; Westerschelde, Rapportage expert commissie, Waterloopkundig Laboratorium, rapport Z1021.
- Van der Weck, A.W., 1994**, Bodemligging Oosterschelde. Veranderingen in de morfologie van platen en slikken sinds de aanleg van de Stormvloedkering, Rapport R94-1, Instituut voor Marien en Atmosferisch onderzoek Utrecht.
- Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, M.A.G. van Helvert, C. Kuijper, A. van der Spek, M.J.F. Stive, P.M.C. Thoolen, Z.B. Wang, 2000**. Langetermijnvisie Schelde-estuarium. Cluster Morfologie. Uitvoeringsfase. Deel 1: Hoofdrapport en Deel 2: Appendices. Z2878. WL | Delft Hydraulics.
- Winterwerp, J.C., M.C.J.L. Jeuken, 2004**, Samenvatting van het morfologisch onderzoek in het kader van de strategisch milieueffectrapportage en de Ontwikkelingsschets 2010, ARCADIS / Technum / WL | Delft Hydraulics.

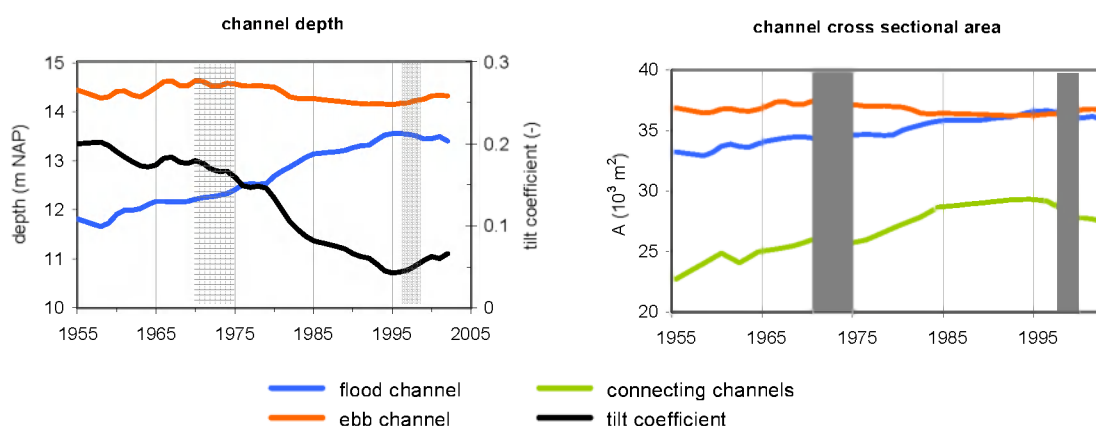
Appendix A Evolutie van het geulenstelsel

De navolgende beschrijving van de ontwikkeling van het geulenstelsel in de Westerschelde voor de periode 1955-2002 is gebaseerd op informatie ontleend aan Jeuken et al (2003b), Jeuken et al (2004) en Jeuken (2000). Het betreft een synthese van waarnemingen sinds 1955, zoals opgenomen in Swinkels (2006). Voor elk van de zes macrocellen worden de veranderingen van (i) de diepte van de hoofdeb- en vloedgeulen, (ii) de dwarsdoorsnede van de hoofdeb- en vloedgeulen en de kortsluitgeulen en (iii) de kantelindex van de hoofdeb- en vloedgeulen gepresenteerd. De kantelindex $K(t)$ betreft de verhouding tussen de diepte van de hoofdeb- en vloedgeul in een macrocel en is gedefinieerd als:

$$K(t) = \ln \left(\frac{h_{EG}(t)}{h_{VG}(t)} \right) \quad (A.1)$$

waarin $h_{EG}(t)$ en $h_{VG}(t)$ respectievelijk de diepte (meter beneden NAP-2 m) van de hoofdeb- en vloedgeulen zijn. Een positieve waarde van $K(t)$ geeft aan, dat de diepte van de ebgeul groter is dan die van de vloedgeul.

1. Macrocel 1: Honte - Schaar van de Spijkerplaat

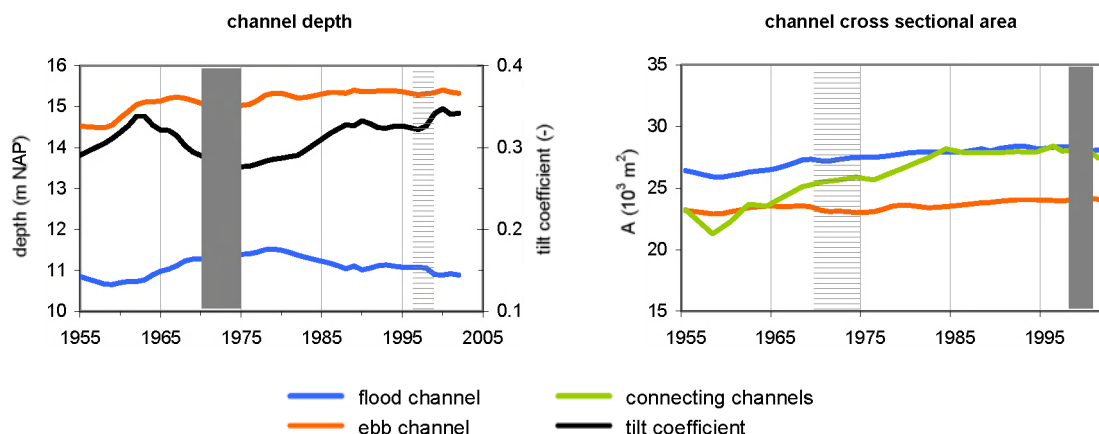


Figuur A.1: Verandering van de geuldiepte en de kantelindex (links) en de geuldoorsnede (rechts) in macrocel 1.

De vloedgeul in macrocel 1 vertoont een verdieping van 12 naar 13,5 meter tussen 1955 en 1995, terwijl de ebgeul met een diepte van 14-14,5 meter vrij stabiel is gebleven. De kantelindex K neemt dus af in de tijd, maar blijft groter dan nul, omdat de diepte van de ebgeul groter is dan de diepte van de vloedgeul. Vanaf 1995 is de kanteling in de richting van de ebgeul (K neemt toe in de tijd), omdat deze geul weer enigszins verdiept, terwijl de vloedgeul verondiept. Dit laatste is het gevolg van de grote stortingen in de vloedgeul sinds de tweede verdieping. Het gemiddelde diepteverschil neemt af van 2,5 meter in 1955 tot ongeveer één meter in 2002. Het drempelgebied vertoont een grote dynamiek, waarbij de dwarsdoorsnede van de kortsluitgeulen toeneemt tot 1995 en sindsdien weer afneemt.

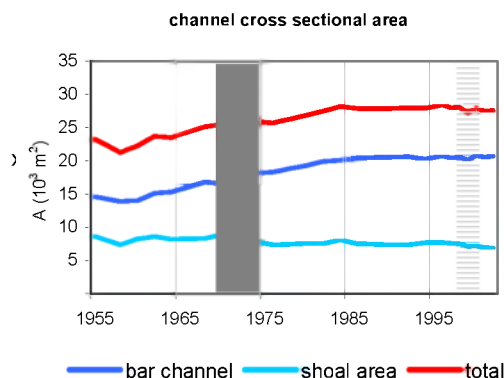
Deze trend wordt veroorzaakt door een ebdominante kortsluitgeul, welke in 1964 is ontstaan en in noordwaartse richting migreerde tot 1984. Aansluitend volgde een periode met degeneratie van de geul, welke mogelijk is versneld door de genoemde stortingen. Momenteel ontstaat een nieuwe kortsluitgeul in het zuiden, zodat in dit geval de cyclus een periode heeft van ongeveer 40 jaren.

2. Macrocel 3: Pas van Terneuzen – Everingen



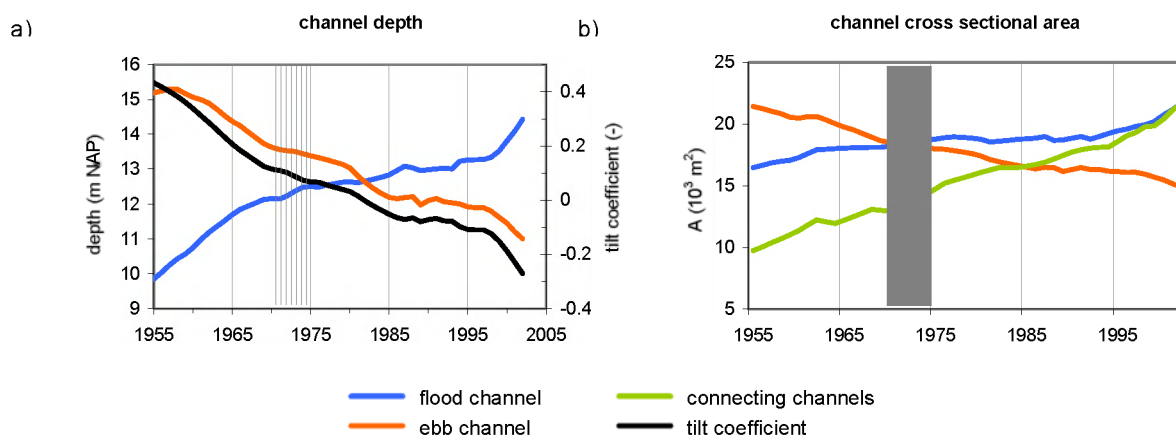
Figuur A.2a: Verandering van de geuldiepte en de kantelindex (links) en de geuldoorsnede (rechts) in macrocel 3.

Tot ongeveer 1962 verruimt de ebgeul, gevolgd door een periode met een geringe erosie. Momenteel lijkt de ebgeul stabiel. De vloedgeul vertoont tot 1980 een verdieping en tot 2002 weer een verondieping. De kantelindex fluctueert gedurende de beschouwde periode, maar blijft op de langere tijdschaal constant; de ebgeul blijft gemiddeld vier meter dieper dan de vloedgeul. Het drempelgebied van de vloedgeul vertoont het meest dynamische gedrag van alle kortsluitgeulsystemen in het estuarium. Vooral de ebdominante geulen hebben een grote migratiesnelheid, gevolgd door snelle degeneratie. De cyclusduur is met 12 jaren relatief kort. De dwarsdoorsnede van de kortsluitgeulen is tussen 1960 en 1985 toegenomen en vervolgens constant gebleven. Macrocel 3 is de enige cel, waar in het drempelgebied ook geulen door de platen tussen de hoofdeb- en vloedgeul zijn voorgekomen. Deze geulen zijn mogelijk overblijfselen van eerdere kortsluitgeulen. Momenteel is slechts één plaatgeul aanwezig, namelijk de ebdominante Zuid-Everingen, welke tussen 1945 en 1955 is ontstaan. De dwarsdoorsnede van de geul lijkt sinds 1996 af te nemen, zie figuur A.2b.



Figuur A.2b: Dwarsdoorsnede van de kortsluitgeulen door het drempelgebied en de platen in macrocel 3.

3. Macrocel 4: Middelgat - Gat van Ossenisie

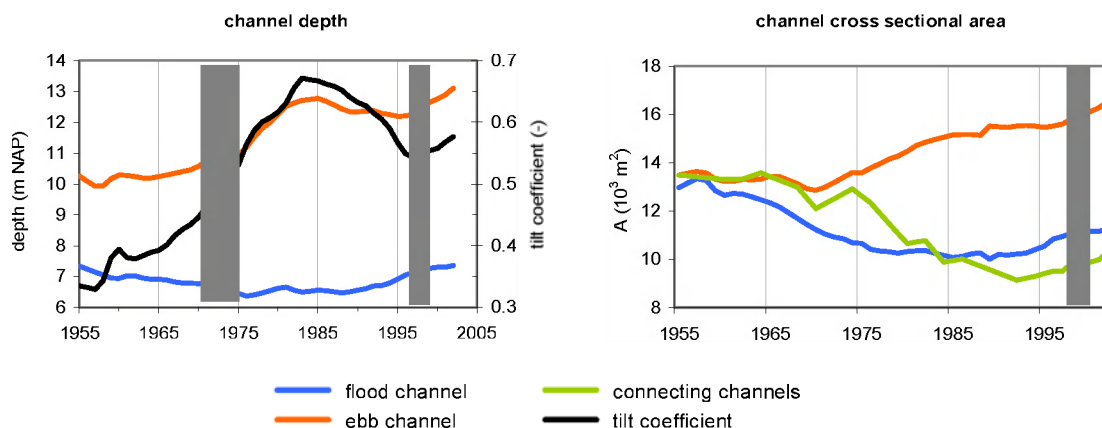


Figuur A.3: Verandering van de geuldiepte en de kantelindex (a) en de geuldoorsnede (b) in macrocel 4.

Door inpolderingen en het afsluiten van geulen hebben in de tweede helft van de 19^e eeuw grote morfologische veranderingen in macrocel 4 plaatsgevonden (PAET, 2004). De evolutie van deze macrocel is echter ook de afgelopen 50 jaren opvallend geweest. De vloedgeul is voortdurend verdiept, van 10 meter tot ruim 14 meter, terwijl de ebgeul verondiepte van 15 meter tot 11 meter. De kantelindex is dus afgenomen van een positieve naar een negatieve waarde. Aanvankelijk was dit een natuurlijk proces; het baggeren in de ebgeul en het storten in de vloedgeul konden de kanteling niet tegengaan. De veranderingen leidden ertoe, dat de vloedgeul sinds 1981 wordt gebruikt als vaargeul. Vlak voor de tweede verdieping was het tempo van de veranderingen afgenomen; echter de tweede verruiming, met inmiddels storten in de ebgeul, leidde weer tot versnelde kanteling van de geulen. De kanteling van de hoofdeb- en vloedgeul is mogelijk het gevolg van de bochtafsnijding van de hoofdebgeul, welke het gevolg was van de ontwikkeling van een ebdominante kortsluitgeul. Deze geul ontstond in 1951 en tot 1984 nam de dwarsdoorsnede met een factor drie tot vier toe en diensgevolge een volledige erosie van het drempelgebied.

Momenteel zijn dan ook geen kortsluitgeulen in deze macrocel aanwezig. De geul door de platen is vermoedelijk een overblijfsel van een ebdominante kortsluitgeul. Zowel de locatie van de geul als de dwarsdoorsnede veranderen weinig.

4. Macrocel 5: Zuidergat en Overloop van Valkenisse - Schaar van Valkenisse en Schaar van Waarde

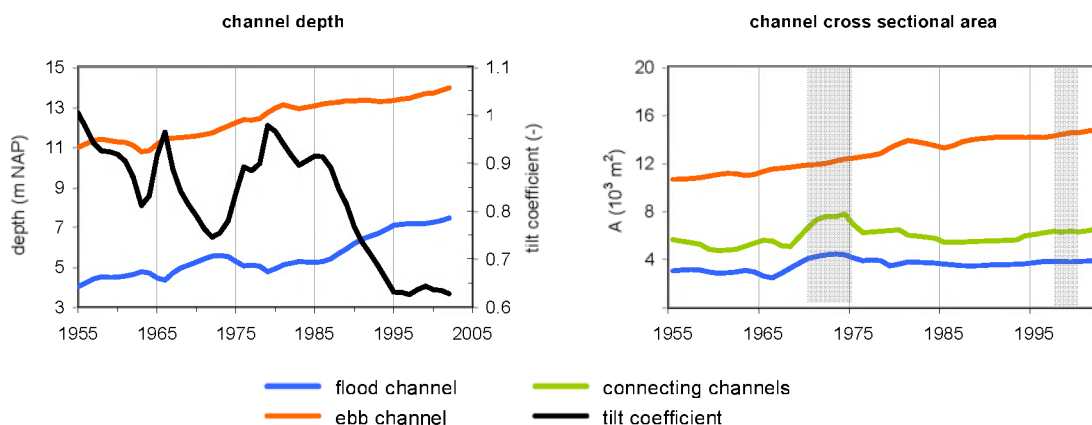


Figuur A.4: Verandering van de geuldiepte en de kantelindex (a) en de geuldoorsnede (b) in macrocel 5.

Macrocel 5 onderscheidt zich van de overige macrocellen door de grote breedte van het estuarium. Mogelijk hierdoor verdeelt de vloedstroming zich over twee geulen, de Schaar van Waarde en de Schaar van Valkenisse, waardoor eerder sprake is van een drie- in plaats van een tweegeulenstelsel. Deze situatie is ontstaan tussen 1905 en 1931. Verder wordt verondersteld, dat de, door de bochtafsnijding gewijzigde, vloedstroming vanuit macrocel 4 voor een groot deel van invloed is geweest op de morfologische ontwikkeling van macrocel 5. Sinds 1980 roteert de vloedgeul in macrocel 5 en migreert deze in zuidwaartse richting. Deze veranderingen van de hoofdgeulen kunnen ook het gedrag van de kortsluitgeulen hebben bepaald. De hoofdebgeul vertoont tussen 1965 en 1983 een verdieping van 10 meter tot bijna 13 meter., waarvan het grootste deel plaatsvindt na de eerste verdieping, gevolgd door een periode (1983-1996) met een geringe verondieping. Sinds 1996 vindt weer een verdere verdieping plaats. De hoofdvloedgeul vertoont een veel minder dynamisch gedrag: geringe verondieping tussen 1955 en 1975 (minder dan één meter) en een geringe verdieping sinds 1990 (vooral in de Schaar van Valkenisse), waardoor de gemiddelde diepte van de vloedgeul sinds 1955 ongeveer zeven meter is gebleven.. Het gemiddelde diepteverschil tussen beide hoofdgeulen is sinds 1955 verdubbeld (van drie naar zes meter). De kantelindex varieert in belangrijke mate gedurende deze periode: tussen 1955 en 1983 een kanteling naar de ebgeul (vermoedelijk een natuurlijk proces, versterkt door het onderhoudsbaggeren van de vaargeul); de eerste verdieping lijkt hier geen invloed op te hebben, vervolgens tot de tweede verdieping een kanteling naar de vloedgeul en tijdens en na de tweede verdieping weer een kanteling naar de ebgeul. Opvallend is, dat de tweede verdieping van invloed lijkt te zijn geweest op het verloop van de kantelindex (evenals de eerste verdieping op het diepteverloop van beide geulen maar niet op de verhouding hiervan).

Door de splitsing van de hoofdvloedgeul in twee afzonderlijke vloedgeulen (Schaar van Valkenisse en Schaar van Waarde) is een dynamisch drempelgebied ontstaan. De beide geulen vertonen een cyclisch gedrag over een periode van 10 tot 20 jaar. Tussen de 1960 en 1973 waren de beide vloedgeulen met de ebgeul verbonden door dynamische, kleine kortsluitgeulen. Ten gevolge van de eerste verdieping verdwenen deze kortsluitgeulen. Rond 1985 is een nieuwe verbinding ontstaan tussen de Schaar van Valkenisse en de hoofdebgeul. De dwarsdoorsnede van deze vloedgeul neemt toe sinds ongeveer 1990, terwijl de afmetingen van de noordelijke vloedgeul sinds 1980 met ongeveer 50 procent zijn afgenomen, waardoor de verbinding met de hoofdebgeul nagenoeg is verdwenen.

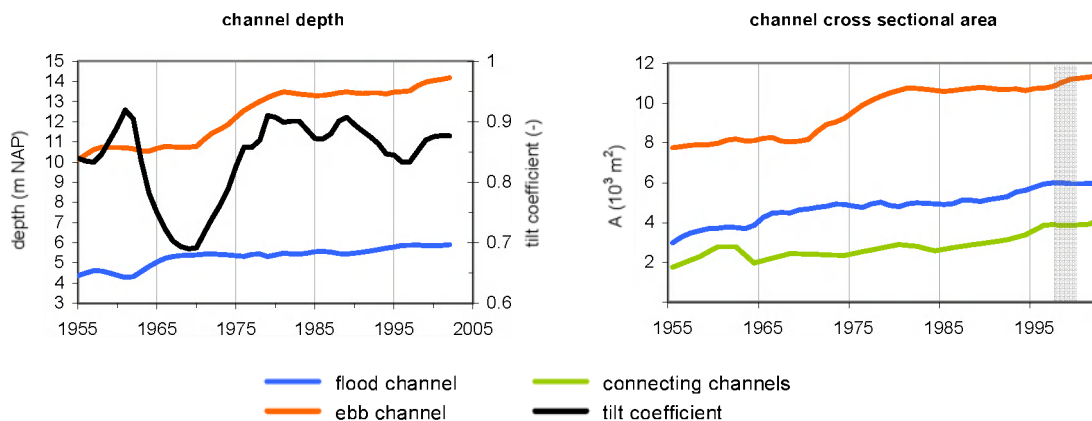
5. Macrocel 6: Nauw van Bath - Schaar van de Noord



Figuur A.5: Verandering van de geuldiepte en de kantelindex (a) en de geuldoorsnede (b) in macrocel 6.

Macrocel 6 wordt gevormd door een relatief klein gebied zonder platen tussen de hoofdeb- en vloedgeul. In de ebgeul wordt al sinds 1922 gebaggerd. Zowel de eb- als de vloedgeul verruimen sinds 1955; in de vloedgeul is de erosie een natuurlijk proces, welke niet wordt beïnvloed door de grote stortingen in deze geul. In de ebgeul wordt de ontwikkeling juist gestuurd door de baggeractiviteiten; zonder baggeren zou deze geul een netto depositie vertonen. De gemiddelde diepte van de ebgeul is sinds 1955 toegenomen van 11 meter tot 14 meter, terwijl voor de vloedgeul de gemiddelde diepte is toegenomen van slechts 4 meter tot ruim 7 meter. De kantelindex vertoont grote fluctuaties, vermoedelijk ten gevolge van de stortingen, met een kanteling naar de vloedgeul op de lange termijn. Vóór 1940 ontstonden kleine en snel migrerende kortsluitgeulen in het drempelgebied van de vloedgeul. Echter, de baggeractiviteiten sinds 1922 lijken het ontstaan van grote migrerende kortsluitgeulen in het drempelgebied te hebben tegen gegaan. De dwarsdoorsnede van de kortsluitgeulen nam tijdens de eerste verdieping toe, maar gedurende de opvolgende periode waren de veranderingen beperkt. Sinds 1990 breidt het drempelgebied zich uit en de enige aanwezige kortsluitgeul vertoont weinig veranderingen.

6. Macrocel 7: Vaarwater boven Bath – Appelzak



Figuur A.6: Verandering van de geuldiepte en de kantelindex (a) en de geuldoorsnede (b) in macrocel 7.

Evenals macrocel 6 wordt macrocel 7 gekenmerkt door netto erosie. De ebgeul verdiept tussen 1955 en 2002 van 10 meter tot 14 meter, vooral tijdens en na de eerste verdieping (er is hier verdiept tot en met 1978, zie Kornman et al, 2002) maar ook tijdens de tweede verdieping, terwijl de diepte van de vloedgeul, ondanks het storten in deze geul, toeneemt van 4,5 meter tot 6 meter. De kantelindex varieerde sterk tussen 1960 en 1975, maar is op de lange termijn weinig veranderd. De constructie van een geleidingsdam (Ballastplaat), eind 60-er jaren van de vorige eeuw bovenstrooms van de vloedgeul, is eveneens van invloed geweest op het gedrag van deze geul. Vóór de aanleg van de geleidingsdam waren kleine migrerende geulen aanwezig op de platen tussen de hoofdgeulen. Door de aanleg van de dam verdwenen deze geulen. Aan het eind van de vloedgeul zijn nog steeds kleine en ondiepe kortsluitgeulen aanwezig, maar hun bewegingsvrijheid wordt beperkt door de geleidingsdam. Alleen voor 1970 was een open verbinding aanwezig tussen de eb- en vloedgeul. Momenteel stroomt water alleen gedurende hoogwater over het drempelgebied en de geleidingsdam. Toch vertoont de dwarsdoorsnede van de kortsluitgeulen een toename sinds 1985.

7. Samenvatting

De bovenbeschreven ontwikkeling van het meergeulenstelsel gedurende de periode 1955-2002 is samengevat in onderstaande tabel:

Macrocel	Hoofdgeulen	Kortsluitgeulen / drempelgebied
1	• Ebgeul: $h_{gem} \sim 14 - 14,5$ meter. • Vloedgeul: $h_{gem}: 12 \rightarrow 13,5$ meter. • 1955-1995: afname $K(t)$; na 1995: toename $K(t)$. • Na 1995: stortingen vloedgeul.	• Grote dynamiek. • Na 1995: afname dwarsdoorsnede. • Cyclusduur: 40 jaar.
3	• Ebgeul: $h_{gem}: 14,5 \rightarrow 15,5$ meter. • Vloedgeul: $h_{gem} \sim 11$ meter. • 1955-2002: $K(t)$ constant. • Na 1995: stortingen vloedgeul.	• Zeer dynamisch. • Tot 1985: toename dwarsdoorsnede; na 1985 constant. • Grote migratie ebdominante geulen. • Cyclusduur: 12 jaar. • Ook geulen over platen.
4	• Ebgeul: $h_{gem}: 15 \rightarrow 11$ meter. • Vloedgeul: $h_{gem}: 10 \rightarrow 14$ meter. • Vanaf 1955: afname $K(t)$. • Versnelde kanteling na tweede verruiming.	• 1951 - 1984: volledige erosie drempelgebied; na 1984 geen kortsluitgeulen meer. • Stabiele geul door platen.
5	• Ebgeul: $h_{gem}: 10 \rightarrow 13$ meter. • Vloedgeul: $h_{gem} \sim 7$ meter. • 1955-2002: toename $K(t)$. • Invloed eerste en tweede verdiepingen. • Cyclisch gedrag vloedgeulen (10-20 jaren).	• Dynamisch drempelgebied. • Verdwijnen geulen na eerste verdieping.
6	• Ebgeul: $h_{gem}: 11 \rightarrow 14$ meter. • Vloedgeul: $h_{gem}: 4 \rightarrow 7$ meter. • 1955-2002: afname $K(t)$. • Invloed stortingen.	• Weinig dynamisch. • Tegengaan kortsluitgeulen door baggeren.
7	• Ebgeul: $h_{gem}: 10 \rightarrow 14$ meter. • Vloedgeul: $h_{gem}: 4,5 \rightarrow 6$ meter. • 1955 $\rightarrow$ 2002: $K(t)$ constant. • Invloed baggeren en geleidings-dam	• Weinig dynamisch. • Beperkte bewegingsvrijheid door geleidingsdam. • Toename dwarsdoorsnede sinds 1985.

H_{gem} : gemiddelde geuldiepte beneden NAP-2 meter.

$K(t)$: kantelindex. Toename $K(t)$ = kanteling naar de ebgeul; afname $K(t)$ = kanteling naar de vloedgeul.

Tabel A.1: Veranderingen meergeulenstelsel sinds 1955.